

Zuverlässigkeit des Verpressens von Spannkanälen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten auf der Baustelle

Kurztitel:

Zuverlässigkeit Verpressen

Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben

von

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Dipl.-Ing. A. Gutsch

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Materialwissenschaft und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Boschstraße 52
D-38106 Braunschweig

Das Vorhaben wird seit Ende 1992 vom Deutschen Ausschuß für Stahlbeton unter der Nummer V 343 gefördert.

Beratergruppe: Schäfer, Schießl, Steinle, Stiller, Wölfel

September 1993

1.	Einleitung und Ziel	1
2.	Schäden	4
3.	Baustoffe	7
3.1	Anforderungen an die Injektionsmörtel	7
3.2	Klinkerzusammensetzung des Portlandzementes	7
3.3	Wasserzementwert	10
3.4	Zusatzmittel	11
3.5	Zusatzstoff Si-Staub	11
3.6	Mikrofeinzemente und Spezialmörtel	13
3.7	Eignungsprüfung	14
3.7.1	Druckfestigkeit	14
3.7.2	Fließvermögen	15
3.7.3	Wasserabsondern	17
3.7.4	Volumenänderung	17
3.8	Offene Fragen	19
3.8.1	Klinkerzusammensetzung	19
3.8.2	w/z-Wert / Zusatzmittel	20
3.8.3	Si-Zusatz	20
3.8.4	Eignungsversuche	20
4.	Hüllrohre	21
4.1	Allgemeines	21
4.2	Belastbarkeit	22
4.3	Dichtheit	23
4.4	Profilierung	24
4.5	Verbindungsteile	25
4.6	Kunststoffhüllrohre	25

5.	Konstruktion	27
5.1	Allgemeines	27
5.2	Rohrhydraulik	27
5.3	Umlenkstellen	28
5.4	Gezielte Ordnung der Spannglieder	28
5.5	Spanngliedneigung	29
5.6	Hüllrohr/Spannstahl-Verhältnis	30
5.7	Ein- und Austrittsöffnungen	31
5.8	Verengungen	33
5.9	Aufweitungen	33
5.10	Offene Fagen	34
6.	Maschinentechnik	35
6.1	Allgemeines	35
6.2	Mörtelmischer	35
6.3	Einpreßpumpen	35
6.4	Durchfluß- / Mengenmessung	36
7.	Verpressarbeit	38
7.1	Allgemeines	38
7.2	Hüllrohrinspektion	38
7.2.1	Dichtheit	38
7.2.2	Durchgängigkeit	39
7.3	Mischen des Mörtel	40
7.4	Einpreßgeschwindigkeit	41
7.5	Einpreßdruck	42
7.6	Nachverpressen	43
7.7	Vakuumverfahren	46

7.8	Temperatur während des Verpressens	47
7.8.1	Hohe Temperaturen	47
7.8.2	Tiefe Temperaturen	47
7.9	Offene Fragen	48
8.	Zerstörungsfreie Messtechnik	50
9.	Qualitätssicherung	52
9.1	Mörtel	52
9.2	Hüllrohre	53
9.3	Verpreßarbeiten	53
9.4	Arbeitsplan für Verpreßarbeiten	54
10.	Arbeitsprogramm	56
10.1	Vorbemerkungen	56
10.2	Laborversuche	56
10.2.1	Mörtel	56
10.2.2	Hüllrohre	57
10.3	Injektionsversuche	58
10.3.1	Prüfstand	58
10.3.2	Modellspannglieder	59
10.3.3	Großspannglieder	59
10.4	Bestehende Bauwerke	60
10.5	Realisierungsrahmen	61
11.	Zusammenfassung	62
12.	Literatur	64

1. EINLEITUNG UND ZIEL

Die Hüllrohrverpressung mit Zementmörtel stellt einen zuverlässigen aktiven Korrosionsschutz des Spannstahls dar. Weil sie eine Baustellenarbeit ist, unterliegt sie gewissen Unsicherheiten. Insbesondere ist es bislang nicht möglich, die vollständige Hüllrohrverfüllung zu überprüfen. Schadensfälle und Brückenuntersuchungen zeigen, daß Spannstahlkorrosion oder gar Spannstahlbrüche oft auf mangelhafte Hüllrohrverfüllung zurückzuführen gewesen sind, ganz besonders dann, wenn noch die Zutrittsmöglichkeit für stahlaggressive Stoffe gegeben war.

Brückeneinstürze in Großbritannien haben dazu geführt, daß das Dep. of Transport 1992 die Ausführung von Spannbetonbrücken mit nachträglichem Verbund für die unmittelbare Zukunft untersagt und zur Überprüfung der Wirksamkeit der Hüllrohrinjektion hinsichtlich Dauerhaftigkeit aufgefordert hat. Als Folge davon bildeten die Concrete Society und die Concrete Bridge Development Group mehrere Arbeitsgruppen. Diese bekamen die Zielvorgabe, Aspekte und Vorschläge zur Verbesserung zusammenzutragen und vorzuschlagen. Ähnliche Aktivitäten sind von anderen Ländern bekannt.

Die Hüllrohrinjektion ist eine Arbeit, in die mehrere Aspekte hineinspielen, wie z.B.: innere konstruktive Durchbildung mit den hydraulischen Folgen, Hüllrohrführung, Mörtелеigenschaften, Verfahrenstechnik, QS, u.a.m. Von all diesen Teilbereichen können Mängel ausgehen.

Ursachen für eine mangelhafte Qualität der Hüllrohrinjektion sind vielfältig. Als wesentliche Gründe sind zu nennen:

- Planungsfehler, konstruktive Randbedingungen
(z.B. Anordnung der Spannglieder, Geometrie, Neigung)
- mangelhafte Ausführung
- Eignung der Baustoffe (insbesondere Mörtel)
- mangelnde Kontrollmöglichkeit während der Ausführung
- neuere Entwicklungen im Spannbetonbau
(z.B. längere Spannglieder mit größeren Vorspannkräften)

Die Literatur enthält zahlreiche Berichte, die sich mit der Hüllrohrinjektion befassen. Diese beziehen sich zum einen auf Untersuchungen an alten Bauteilen /2/3/27/36/40/42/49/50/51/ zum anderen auf Verpreßversuche /18/35/39/46/, mit denen Verbesserungen des Injektionserfolgs untermauert werden sollen.

Bereits in den 70er Jahren wurden Verpreßversuche an Spanngliedern durchgeführt. Hintergrund war der Trend zu immer größeren und längeren Spanngliedern /18/29/39/. Als Resultat werden Empfehlungen für zuverlässiges Verpressen gegeben.

Ziel der Forschungsarbeit ist es, weitere Verbesserungsvorschläge für das zuverlässige Verpressen von Spanngliedern zu erarbeiten. Dabei ist der enge Kontakt zur Praxis unabdingbar. Die Forschungsarbeit setzt sich zum Ziel:

- Zementmörtel mit verbesserten physikalisch-chemischen und technologischen Eigenschaften zu erproben bzw. und weiterzuentwickeln,
- die derzeitigen Methoden zur Mörtelherstellung, -prüfung kritisch zu betrachten und Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten,
- konstruktive Möglichkeiten zur Verbesserung der hydraulischen Bedingungen im Hüllrohr aufzuzeigen,
- die Brauchbarkeit von baustellengeeigneten Prüfverfahren zur Kontrolle der Einpreßarbeiten zu untersuchen.

Im folgenden wird ein Überblick über diejenigen Punkte gegeben, die für eine gute Spanngliedverfüllung wichtig sind. Dabei werden zunächst die Mörtel und deren Eigenschaften betrachtet. Daraufhin wird auf die Hüllrohre sowie deren Anordnung im Bauwerk eingegangen. Die Bedingungen im Hüllrohr tragen entscheidend zu einer guten Verfüllung der Spannglieder bei. Weiterhin hängt der Erfolg der Hüllrohrinjektion von der Verfahrenstechnik ab. Hierbei läßt sich zwischen Maschinenteknik und Arbeitsweise auf der Baustelle unterscheiden.

Schließlich wird ein Arbeitsprogramm vorgestellt, nach dem im Rahmen der Forschungsarbeit vorgegangen werden soll. Zunächst sollen unterschiedliche Mörtel auf ihre Brauchbarkeit für Verpreßarbeiten untersucht werden. Zum einen interessiert, wie sich die Mörtel Eigenschaften günstig beeinflussen lassen. Zum anderen sollen aussagekräftige Kriterien zur Beurteilung von

Zementen und Mörteln für die Eignung zur Spanngliedverpressung abgeleitet werden.

Da die Qualität der Verpressung entscheidend vom Zusammenspiel aller Einflußparameter abhängt, sollen im zweiten Arbeitsabschnitt komplette Spannglieder unter praxisnahen Bedingungen verpreßt werden. Dabei wird zunächst mit Versuchen an Modellspanngliedern begonnen. Anschließend sollen die gesammelten Erfahrungen in Großversuchen kombiniert werden.

2. SCHÄDEN

In der Vergangenheit sind immer wieder Schäden an Spannbetonbauwerken aufgetreten, die auf nicht ordnungsgemäß verfüllte Hüllrohre zurückzuführen waren. Die Folge hiervon waren Korrosion des Spannstahls und korrosionsinduzierte Brüche, sofern bestimmte Voraussetzungen vorlagen. Einige der letzteren waren: Hüllrohrwasser mit Korrosionspromotoren, Tausalzeintritt, Feuchtebedingungen mit Kondensation am Spannstahl, erhöhte Spannstahlempfindlichkeit u.a.m.

Werden unvollständig verfüllte Hüllrohre noch während der Bauphase entdeckt, so können geeignete Sanierungsmaßnahmen sofort eingeleitet werden. Häufig werden Schäden jedoch erst viele Jahre nach Fertigstellung entdeckt, so daß umfangreiche und kostenintensive Sanierungsmaßnahmen notwendig werden. In vielen Fällen werden dadurch die Nutzung bzw. die Nutzungsdauer eingeschränkt. Bei einer Gefährdung der Standsicherheit ist sogar ein vollständiger Ersatz des Bauwerkes unvermeidbar.

Die Schäden an Spannbetonbrücken sind in individuellen Schadensgutachten und in /2/3/28/40/42/47/49/50/51/ dokumentiert. Einige der Schäden werden im folgenden näher beschrieben:

- Im Jahr 1979 wurde an einer Brücke während des Spannens eine erhöhte Reibung festgestellt /2/. Offensichtlich wurde beim Betonieren und Rütteln das Hüllrohr beschädigt, so daß Bauwerksbeton in das Hüllrohr eindringen konnte. Dieses hatte eine Reduzierung des Hüllrohrquerschnitts zur Folge. Derartige Querschnittsverminderungen sind zum einen oft Ursache für Verstopfer, zum anderen kann der Spannstahl beim Einschieben und Vorspannen an der Oberfläche verletzt werden. Gründe für die Beschädigungen der Hüllrohre waren zu kleine Rüttelgassen (< 6 cm) und ein zu steifer Beton. Außerdem waren die Hüllrohre unzureichend an der schlaffen Bewehrung befestigt, so daß sie sich beim Rütteln verschieben konnten.

- An einer Brücke wurde 1977 festgestellt, daß ein Teil der Quer- und Längsspannglieder nicht oder unvollkommen mit Mörtel verfüllt war /2/. Dieses war auf mangelhafte Sorgfalt beim Verpressen zurückzuführen. Zudem wurde während der Verpreßarbeiten das zu verfüllende Volumen nicht kontrolliert. Es muß deswegen gefordert werden, daß Verpreßarbeiten nur von sachkundigem Personal durchgeführt werden. Weiterhin ist eine lückenlose Dokumentation über den Verlauf der Arbeiten erforderlich. Diese umfaßt eine Mengen und/oder Volumenbilanz. Dieses muß Bestandteil des QS-Konzeptes sein.

Zu bemerken ist noch, daß bei dieser Brücke Spannstahlkorrosion ausschließlich an unvollständig verfüllten Spannglieder festgestellt wurde. Bei vollkommen verpreßten Spanngliedern traten keine Korrosionserscheinungen auf.

- Bei einem Bauwerk wurden ebenfalls unverpreßte Spannglieder gefunden /2/. Der Grund dafür waren Mängel bzw. Unregelmäßigkeiten bei den Verpreßarbeiten. Während der Arbeiten wurde versucht, nicht durchgängige Hüllrohre durch Wasserspülung durchgängig zu machen. Nach dem Verpressen blieb jedoch Wasser im Hüllrohr zurück. Dies hatte Hohlräume im Hüllrohr zur Folge. Da Wasser oft schlecht vollständig aus dem Hüllrohr entfernt werden kann, muß heute die Durchgängigkeit vorzugsweise mit Luft anstatt mit Wasser geprüft werden.
- Bei schlecht verfüllten Hüllrohren treten Korrosionsschäden am Spannstahl und am Hüllrohr auf. Dennoch schließt /36/ Kontakt- oder Spaltkorrosion aus, da das umgebende Medium - auch das eingeschlossene Wasser - durch den Mörtel einen hohen pH-Wert besitzt. Die Spannungsrißkorrosion ist als die kritische Komponente anzusehen.
- Untersuchungen an alten abgebrochenen Brücken wiesen darauf hin, daß die Chloridbelastung und die Karbonatisierung im Einpreßmörtel auch nach vielen Jahren unter Gebrauch nicht überaus hoch waren /28/.

- An einer Brücke wurden während der Bauphase Lufteinschlüssen in den Ankerbereichen entdeckt. Zur Klärung der Ursachen wurden Verpreßversuche an identischen Spanngliedern durchgeführt /46/. Offensichtlich waren die Fehlstellen darauf zurückzuführen, daß eine zu große Einpreßgeschwindigkeit von etwa 60 m/min gewählt wurde. Bei den begleitend durchgeführten Verpreßversuchen wurde mit Einpreßgeschwindigkeiten von 30 und 12 m/min eine gute Spanngliedinjektion erreicht. Dieses gelang trotz einer vorangegangenen Spülung mit Wasser. Nach der Wasserspülung wurden die Spannglieder mit Luft ausgeblasen. Auf konstruktiver Ebene wurde bei den folgenden Bauabschnitten eine zusätzliche Entlüftung an den Hochpunkten der Anker angeordnet.
- Bei einer Brücke /47/ wurden bereits wenige Jahre nach der Fertigstellung unterschiedliche Schäden am Überbau entdeckt. Nach eingehenden Untersuchungen wurden auch Mängel bei der Spanngliedinjektion festgestellt. Einige Spannglieder waren gar nicht oder nur teilweise verpreßt. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß die Spannischen aus baubetrieblichen Gründen teilweise nicht zugänglich waren. Außerdem wurde keine Kontrolle über die eingepreßten Mörtelmengen vorgenommen. Zur Sanierung wurden die Spannglieder an Hoch- und Tiefpunkten angebohrt. Die vorgefundenen Hohlräume wurden nachträglich mit dem Vakuumverfahren verfüllt. Dieses Verfahren ist überaus zeit- und kostenaufwendig. Es bedarf darüber hinaus einer großen Sachkenntnis und Sorgfalt.

Die wesentlichen Ursachen für eine unvollständige Verfüllung der Hüllrohre können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- nicht durchgängige Hüllrohre infolge Verstopfer, Hüllrohrbeschädigungen
- fehlende Kontrolle des Verpreßvolumens
- zu große Einpreßgeschwindigkeit
- Ein- und Auslauföffnungen unsachgemäß angeordnet
- ungeeignete Mörtel Eigenschaften (Absetzen von Wasser, zu schnelles Ansteifen)
- vorangegangene Wasserspülung

3. BAUSTOFFE

Die Eignung der Verpreßmörtel wird von zahlreichen stofflichen, rheologischen und technologischen Eigenschaften bestimmt. Aus diesem Grund werden die folgenden stofflichen Parameter behandelt. Wege zur Klärung werden angerissen.

3.1 Anforderungen an die Injektionsmörtel

Neue Entwicklungen und Anwendungen im Spannbetonbau führen auch zu längeren Spanngliedern. Folglich muß der Mörtel im Hüllrohr über längere Strecken bewegt werden. Gleichzeitig ging der Trend zu größeren Vorspannkraften der einzelnen Spannglieder. Dieses führte zu größeren Spannstahlquerschnitten, einer größeren Anzahl von Litzen oder Einzeldrähten im Hüllrohr und einem größeren Hüllrohrdurchmesser. Als Folge stieg das zu verpressende Volumen an.

Bei einer großen Anzahl von Litzen oder Einzeldrähten werden die Fließbedingungen im Hüllrohr komplizierter. Zwischen den Litzen bzw. Einzeldrähten kann es zum Auspressen des Wassers kommen, zum sogenannten Drainageeffekt. Die Folge sind Verstopfer. Bei einer großen Anzahl von Litzen bzw. Einzeldrähten ist außerdem die Quерläufigkeit des Mörtels nicht mehr gesichert. Es besteht die Gefahr, daß einzelne Spannstähle nicht allseitig mit Mörtel ummantelt sind.

Als Folge der neuen Entwicklungen müssen an den Injektionsmörtel höhere Anforderungen in folgenden Bereichen gestellt werden:

- gutes Fließvermögen über lange Zeiträume
- niedrige Viskosität
- keine Entmischungsneigung
- kein bzw. geringes Wasserabsondern (Bluten) auch bei großen Querschnitten

3.2 Klinkerzusammensetzung des Portlandzementes

Für das Verpressen von Spanngliedern dürfen nach DIN 4227 T.5 ausschließlich Portlandzemente PZ 35 F, PZ 45 F und PZ 55 F verwendet werden. Überwiegend

wird PZ 45 F eingesetzt. In der Praxis zeigt sich immer wieder, daß nicht alle Zemente einer Klasse in gleicher Weise für Verpreßarbeiten geeignet sind. Betroffen davon sind insbesondere die Eigenschaften des frischen Mörtels, wie Fließvermögen und Wasserabsetzen /58/.

Auch für Spannbetontragwerke nach EC 2, T.1 und T.2 /10/11/ darf nur Portlandzement CE I nach ENV 197 /13/ verwendet werden. Als Festigkeitsklasse dürfte sich hier CE I 42.5 R durchsetzen, die nach DAfStb-Richtlinie /4/ der Festigkeitsklasse 45 F gleichzusetzen ist. Die Anforderungen für Einpreßmörtel regelt pr EN 447 (1990) /16/.

Die unterschiedlichen Eigenschaften des Frischmörtels werden in erster Linie von der Klinkerzusammensetzung und der Mahlfeinheit bestimmt. Da der C_3A -Gehalt und die Sulfate besonders die erste Phase der Erstarrung bestimmen, spielen deren Anteile und Reaktivität eine besondere Rolle.

Die Mahlfeinheit wird ausgedrückt über die spezifische Oberfläche. Bei verschiedenen Zementen PZ 45 F schwankt sie zwischen 3700 und 4500 cm^2/g (nach Blaime) /1/. Es ist fraglich, ob die Mahlfeinheit die allein bestimmende Größe ist. Vielmehr scheint die Korngrößenverteilung aus heutiger Sicht zur Beurteilung der Reaktivität aussagekräftiger /30/31/32/. Zur Beurteilung der Eignung ist dieser Parameter z. Z. jedoch nicht gebräuchlich.

Daß nicht alle Zemente PZ 45 F in gleicher Weise für das Verpressen von Spanngliedern geeignet sind, ist durch Versuche belegt /29/. Mit dem dort verwendeten PZ 45 F + EH wurden keine guten Verpreßergebnisse erzielt. Als Resultat der Versuche wird empfohlen, daß der Mörtel nicht allzu schnell ansteifen sollte, um auch einige Zeit nach dem Mischen ein gutes Fließvermögen zu besitzen. Langsam reagierende Portlandzemente sind daher zu bevorzugen /29/. Es wird empfohlen, den C_3A -Gehalt zu reduzieren bzw. die Reaktivität zu senken.

In /34/44/ sind weitere Hinweise bezüglich des Zusammenhangs von Zementzusammensetzung, Reaktivität der Klinkerphasen und der Verarbeitbarkeit des Mörtels zu finden.

Neben der Zusammensetzung hängt die Reaktivität des Zementes sehr stark von seinem Alter und von seiner Temperatur ab. In der DIN 4227 T.5 /7/ wird

gefordert, daß der Zement am Tag der Verarbeitung nicht älter als drei Wochen sein darf (gerechnet vom Tag der Lieferung).

In der Praxis kommen sehr frische Zemente mit sehr hohen Temperaturen (bis 70 °C) auf die Baustelle. Da hohe Zementtemperaturen jedoch zu einem schnellen Ansteifen führen, wird der Zement einige Tage auf der Baustelle zwischengelagert und damit abgekühlt. Geeignete Beurteilungskriterien, in welchem Alter und bei welchen Eigentemperaturen die Zemente für das Verpressen am besten geeignet sind, fehlen zur Zeit noch.

Die Praxis hat im Laufe der Zeit Erfahrungen gesammelt, welche Zemente des jeweiligen Herstellers für das Verpressen von Spanngliedern besonders geeignet sind. Um Schwierigkeiten während der Verpreßarbeiten aus dem Weg zu gehen, wird vom für das Verpressen verantwortlichen Unternehmen der PZ 45 F desselben Zementherstellers verwendet, mit dem in der Vergangenheit die wenigsten Probleme aufgetreten sind. Dem Unternehmer liegen heute jedoch keine Beurteilungskriterien vor, die Aussagen über die Brauchbarkeit der jeweiligen Zementlieferung gestatten. Für ein lückenloses QS-Konzept wäre es deswegen wünschenswert, über derartige Beurteilungskriterien zu verfügen. Es ist klärend, ob anhand von Klinkerbestandteilen, Korngrößenverteilung und Zementalter auf die Eignung des Zementes geschlossen werden kann.

Es verblüfft zu erfahren, daß die einzelnen Spannbetonunternehmen jeweils auf ihre speziellen Zementlieferanten schwören (Weinbauerprinzip). Bei diesem bestellen sie den PZ 45 F für eine Verpreßarbeit, sind entweder zufrieden oder auch nicht. Es ist bis heute noch nicht gelungen, von der Zementindustrie ausgewiesene PZ 45 F für Verpreßarbeiten mit nachprüfbarer Eignung zu erhalten.

Da heute ein längeres Fließvermögen und eine längere Verarbeitbarkeit der Mörtel gefordert wird, muß überlegt werden, ob in Analogie zur Erhärtungsfunktion ein Zusammenhang zwischen der Erstarrungszeit und der Viskosität gefunden werden kann. Mit Hilfe einer solchen Funktion kann unter Berücksichtigung der Temperatur auf die Dauer der Verarbeitbarkeit des Mörtels geschlossen werden.

3.3 Wasserzementwert

Der w/z-Wert ist nach oben zu beschränken, um die Wasserabsonderung (Bluten) zu minimieren und um bestimmte Festmörteleigenschaften zu sichern. Das Absetzen von Wasser kann an Hochpunkten zu Wasseransammlungen und folglich zu Inhomogenitäten führen. Der w/z-Wert kann jedoch nicht beliebig reduziert werden, da sonst das Fließvermögen eingeschränkt ist. Nach DIN 4227 T.5 /7/ muß der w/z-Wert bei Einpreßmörtel kleiner gleich 0,44 sein. Dieses entspricht auch der pr EN 447 /16/. Ergänzend dazu ist in der ZTV-K 80 /57/ festgelegt, daß ein w/z-Wert größer 0,40 der Zustimmung des Auftraggebers bedarf. Nach SIA 162 /53/ sollte der w/z-Wert zwischen 0,34 und 0,42 liegen. Weiterhin wird nach SIA 162 /53/ davon ausgegangen, daß die Frostbeständigkeit des Injektionsmörtels bei einem w/z-Wert kleiner 0,40 gewährleistet ist.

Um einen gleichbleibenden w/z-Wert während der Verpreßarbeiten sicher zu stellen, empfiehlt DIN 4227, T.5 /7/ die Verwendung von Sackzement. Da das Gewicht der Zementsäcke jedoch Schwankungen unterworfen ist, muß bezweifelt werden, daß eine Mengennmessung auf dieser Basis hinreichend genau ist /1/.

Hüllrohre werden häufig direkt vor dem Verpreßvorgang mit Wasser durchspült, um die Durchläufigkeit zu prüfen und um eventuelle Schmutzteile sowie Hüllrohrwasser (Undichtigkeit) auszuspülen (Ausnahmen hiervon enthalten die Zulassungsbescheide). Nach dem Spülen mit Wasser wird das Hüllrohr mit Luft ausgeblasen, um das Wasser zu entfernen. Dennoch kann besonders an Tiefpunkten und in Hüllrohrsicken Restwasser übrig bleiben. Dieses Restwasser wird durch den Einpreßmörtel verdrängt. An der Mörtelfront kann es zum Vermischen von Mörtel und Restwasser kommen. Die Folge ist ein undefinierter Anstieg des w/z-Wertes an der Mörtelfront.

Um Reserven für die Aufnahme von Restwasser zu haben, ohne den zulässigen w/z-Wert zu überschreiten, sollte ein möglichst niediger w/z-Wert verwendet werden. In /35/ wird ein w/z-Wert kleiner gleich 0,3 vorgeschlagen. Um die für das Verpressen notwendige Konsistenz zu erreichen, sollte Fließmittel zugegeben werden.

3.4 Zusatzmittel

Durch die Verwendung von Zusatzmitteln lassen sich Frisch- und Festbetoneigenschaften verändern und den Erfordernissen anpassen. Beim Verpressen von Hüllrohren ist nach DIN 4227, T.5 /7/ nur die Zugabe von Einpreßhilfen EH erlaubt. Diese vermindern den Wasseranspruch und das Absetzen von Wasser. Zusätzlich bewirken sie ein leichtes Quellen zur Verminderung von Hohlstellen.

Üblicherweise beträgt die Zugabe von EH 1,0 M. % des Zementgehaltes. Bei einem besonders innigen Mischverfahren kann die Zugabe von EH u.U. auf 0,5 M. % reduziert werden.

Nach der pr EN 447 /16/ ist die Verwendung von einzelnen und kombinierten Zusatzmitteln gemäß EN 104.300 /17/ gestattet. Werden mehrere Zusatzmittel gleichzeitig verwendet, sind wechselseitige Beeinflussungen möglich. Der unbedenkliche Einsatz mehrerer Zusatzmittel muß durch Eignungsversuche belegt werden. Dieses Vorgehen entspricht auch pr EN 447 /16/.

Beim Verpressen von Rissen und Felsklüften ist es üblich eine Kombination von Zusatzmitteln zuzugeben. Fließmittel werden zugegeben, um die gewünschte Konsistenz zu erreichen. Die Zugabe von Luftporenbildner sorgt durch gezieltes Quellen für eine Verminderung des Schwindens. Dadurch steigt jedoch die Porosität des Mörtels. Eine größere Porosität hat eine Verringerung des chemisch-physikalischen Widerstandes des erhärteten Mörtels zur Folge. Dieses ist bezüglich des Korrosionsschutzes (auch Cl-Eindringung) nicht wünschenswert.

Bisher ist nicht geklärt, ob durch die Zugabe von FM mit einem verstärkten Wasserabsondern zu rechnen ist. Außerdem ist nicht bekannt, in welchen Mengen LP zugegeben werden darf, ohne den physikalisch-chemischen Widerstand des erhärteten Mörtels nenneswert zu beeinträchtigen.

3.5 Zusatzstoff Si-Staub

Umfangreiche Versuche /23/42/43/45/48/ belegen, daß sowohl die Eigenschaften des frischen Mörtels als auch die Eigenschaften des festen Mörtels durch die

Zugabe von Mikrosilika-Staub (Si-Stoff: meist als slurry geliefert und zugegeben) verbessert werden können. Durch die sehr feinen, kugeligen und glasigen Partikel wird im Frischmörtel ein besseres Fließvermögen erzielt. Gleichzeitig nimmt die Langzeitstabilität des Frischmörtels zu. Die Gefahr der Wasserabsonderung (Bluten) wird geringer.

Im erhärteten Zementstein bewirkt der hohe SiO_2 -Gehalt des Mikrosilika-Staubes eine bessere Vernetzung der Klinkerphasen. Dadurch wird die Zementsteinstruktur verfeinert. Der Gelporenanteil nimmt auf Kosten der Kapillarporen zu. Das Resultat ist eine größere Dichtigkeit gegenüber aggressiven Medien sowie eine höhere Festigkeit. Durch die Zugabe von Si-Staub bei Einpreßmörteln kann das Eindringen von Chloriden deutlich reduziert werden /42/.

Mikrosilika-modifizierte Mörtel für Verpreßarbeiten an Spanngliedern wurden schon verschiedentlich mit Erfolg eingesetzt /22/29/43/45/. Bei allen Versuchen konnten die Eigenschaften des frischen Mörtels durch einen Mikrosilikazusatz verbessert werden. Die verbesserten Eigenschaften wirkten sich positiv auf den Verpreßerfolg aus.

Nach DIN 4227 T.5 /7/ darf dem Einpreßmörtel jedoch nur ein Zusatzstoff zugegeben werden, der nicht latent-hydraulisch reagiert. Nach pr EN 447 /16/ ist bei üblichem Einpreßmörtel ebenso die Zugabe von Zusatzstoffen verboten. Lediglich bei besonderen Einpreßmörteln ist die Zugabe von Zusatzstoffen erlaubt. Diese besonderen Mörtel sind jedoch nicht für das Verpressen von Spanngliedern vorgesehen.

Unter Berücksichtigung der geltenden Normen ist die Verwendung von Mikrosilika-Staub somit ausgeschlossen. Der Grund für ein Verbot von latent-hydraulischen Zusatzstoffen für das Verpressen von Spanngliedern ist offenbar in der Reaktion mit dem Calciumhydroxid Ca(OH)_2 zu suchen. Für einen guten Korrosionsschutz ist eine ausreichende Menge von Ca(OH)_2 im Zementstein als alkalischer Puffer erforderlich. Gleichzeitig wird das Ca(OH)_2 bei der latent-hydraulischen Reaktion mit dem Mikrosilika-Staub verbraucht. Es ist jedoch fraglich, ob durch die latent-hydraulische Reaktion soviel Ca(OH)_2 verbraucht wird, daß die Alkalität des Mörtels signifikant abnimmt und der Spannstahl nicht mehr ausreichend vor Korrosion geschützt ist. Der Fragestellung kann in Versuchen eingehend nachgegangen werden.

3.6 Mikrofeinzemente und Spezialmörtel

In jüngster Zeit wurden die sogenannten Mikrozemente entwickelt. Sie dienen zur Herstellung von Spezialmörteln zur Verpressung feinsten Risse im Beton und zur Bodeninjektion. Über sie wird in /30/31/32/ berichtet. Sie zeichnen sich durch eine sehr große spezifische Oberfläche aus ($8.000 - 16.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ nach Blaime). Noch entscheidender als die spezifische Oberfläche ist die Korngrößenverteilung. Der Kornanteil $< 16 \mu\text{m}$ beträgt bei Mikrozementen über 95 %.

Durch die große Mahlfeinheit erhöht sich der Wasseranspruch. Wasser-Bindemittel-Werte bis $w/b = 8$ sind normal, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu erreichen. Nur durch den gezielten Einsatz von Zusatzmitteln kann der w/b -Wert reduziert werden. Dieses geschieht insbesondere im Hinblick auf eine niedrige Porosität und eine höhere Dauerhaftigkeit. Durch die Verwendung von Injektionshilfen IH kann der w/b -Wert um 50 % reduziert werden /32/.

Für das Eindringen von Mörtel in feine Risse und Böden ist die Korngröße entscheidend. Die Korngrößenverteilung wird neben dem w/b -Wert von der Erstarrungszeit beeinflusst. Bei einem niedrigen w/b -Wert wird die Korngrößenverteilung in den groben Bereich verschoben. Das gleiche gilt bei fortschreitender Erstarrung /32/. Dieses ist auf die Anlagerung von Hydratationsprodukten und auf die Agglomeration von Zementpartikel zurückzuführen.

Nach eigenen Erfahrungen konnten mit Mikrozementen von der Bauteiloberfläche 0,1 mm breite Risse auf einer Länge von mehr als 10 m bis in 0,05 mm breite Rißwurzeln zuverlässig verpreßt werden. Obwohl beim Verpressen von Spanngliedern die Korngrößenverteilung von untergeordneter Bedeutung ist, können sie auch für Hüllrohrinjektionen in Frage kommen. Außerdem interessieren insbesondere die mit den Mikrozementen gewonnenen Erfahrungen. Diese sind teilweise sicherlich auf Einpreßmörtel übertragbar.

Im Vergleich zu handelsüblichen Zementen beträgt der Preis von Mikrofeinzementen etwa das fünffache. Dabei fällt jedoch auf, daß für diese Zemente und deren Einsatzzwecke detaillierte Produktbeschreibungen und Produkthanforderungen entwickelt werden. Ebenso existieren Kriterien für

Eignungs- und Güteprüfungen. Derartige Kriterien liegen bei Zementen für das Verpressen von Spanngliedern nicht vor.

Es ist im Sinne der Qualitätsverbesserung nicht einzusehen, warum nicht auch für Zemente von Einpreßmörteln derartige Kriterien entwickelt und offengelegt werden. Unter Umständen kann sogar an eine Eignungsprüfung und eine Zulassung von Zementen für das Verpressen von Spanngliedern gedacht werden. Damit eventuell verbundene Kostensteigerungen der Verpreßarbeiten müssen bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens eindeutig in den Hintergrund treten.

3.7 Eignungsprüfung

Die Anforderungen an Einpreßmörtel sind in der DIN 4227 T.5 /7/ geregelt. Ergänzend dazu sind im Rahmen der europäischen Normung die Entwürfe pr EN 445 /14/ und pr EN 447 /16/ entstanden; pr EN 447 /16/ befaßt sich mit den Anforderungen, pr EN 445 /14/ mit den Prüfverfahren für Einpreßmörtel. Bei den Entwürfen pr EN 445 und pr EN 447 ist eine deutliche Weiterentwicklung von T.5 zu erkennen, mit dem Ziel, die Qualität der Hüllrohrinjektion insgesamt zu verbessern. Die Normen pr EN 445 bis 447 entsprechen den Normen DIN 4227, T.10 bis T.12.

Die Eignungsprüfungen sind in der DIN 4227 T.5 /7/ bzw. in pr EN 445 /14/ geregelt. Es sind folgende Prüfungen durchzuführen:

- Druckfestigkeit
- Fließvermögen
- Wasserabsondern
- Raumänderung
- Druckfestigkeit nach 7 d und 28 d

3.7.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit läßt einen Rückschluß auf die Festmörtelqualität zu. Diese ist für die Verbundwirkung zwischen Spannstahl und Einpreßmörtel sowie für die Kraftübertragung zum Bauwerk wichtig. In bezug auf den Korrosionsschutz und die Verpreßqualität ist die Mörteldruckfestigkeit von

untergeordneter Bedeutung. Voraussetzung ist jedoch, daß nach dem Verpressen keine Inhomogenitäten im Mörtel verbleiben.

3.7.2 Fließvermögen

Nach DIN 4227 T.5 /7/ wird das Fließvermögen mit Hilfe des Eintauchversuches ermittelt (Bild 1). Der Entwurf der DIN 4227 T.11 /14/ gibt zusätzlich die Möglichkeit, das Fließvermögen mit dem Trichter Versuch zu bestimmen (Bild 2). Da z.Z. noch die DIN 4227 T.5 gültig ist, wird der Trichter Versuch in der Praxis kaum angewendet.

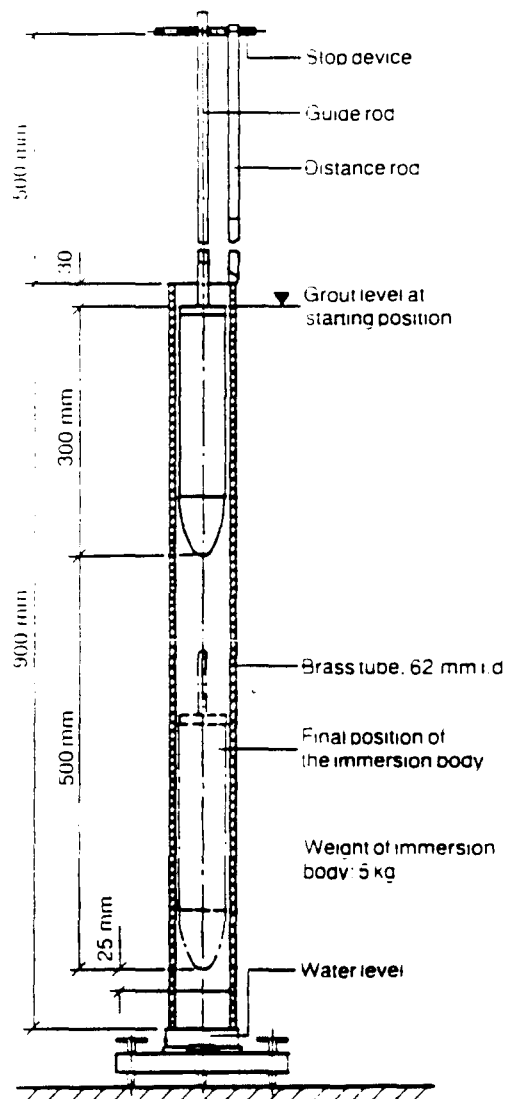


Bild 1: Gerät für den Eintauchversuch nach pr EN 445, aus /21/

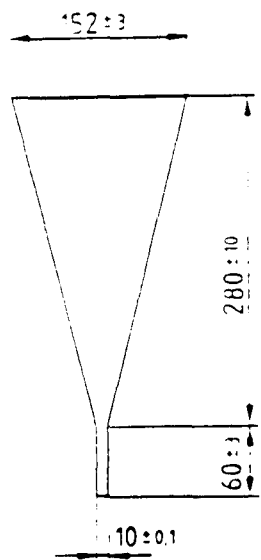


Bild 2: Gerät für den Trichterversuch nach pr EN 445, aus /14/

Beim Eintauchversuch wird die Zeit gemessen, die ein Kolben benötigt, um in einem mörtelgefüllten Zylinder einen bestimmten lotrechten Weg zurückzulegen. Als Kraft wirkt das Eigengewicht des Kolbens. Beim Trichterversuch wird die Zeit gemessen, bis der Mörtel aus dem Trichter mit einem bestimmten Volumen ausgelaufen ist.

Der Vorteil des Trichterversuches ist, daß dieser schneller durchgeführt werden kann. Während der Eintauchversuch durchaus 10 Minuten dauern kann, erlaubt der Trichterversuche bereits wenige Minuten nach Mischungsende Aussagen zum Fließvermögen. Zwischen Mischungsende und Einpreßbeginn geht so weniger Zeit verloren. Dieses ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn bei hohen Temperaturen verpreßt wird oder wenn die Anforderungen an das Fließvermögen nicht beim ersten Mischen erreicht werden.

Prüf- verfahren	Unmittelbar nach dem Mischen (s)	30 Minuten nach dem Mischen (s)	an der Austritts- öffnung des Hüll- rohres (in s)
Eintauchgerät	≥ 30	≤ 80	≥ 30
Auslauftrichter	≤ 25	≤ 25	≥ 10

Tab.1: Die Anforderungen an das Fließvermögen /14/

Nach DIN 4227 T.5 und T.10 wird das Fließvermögen des Mörtels sofort nach dem Mischen, 30 Minuten nach dem Mischen und an den Austrittsöffnungen gemessen. Die mit dem Eintauchgerät einzuhaltenden Anforderungen stimmen bei Teil 5 und Teil 10 (DIN 4227) überein (Tab.1).

3.7.3 Wasserabsondern

Nach DIN 4227 T.5 wird das Wasserabsondern in Verbindung mit der Volumenänderung bestimmt. Das Prüfgefäß hat einen Durchmesser von $d = 100 \text{ mm}$ und eine Höhe von $h = 120 \text{ mm}$. Das Gefäß wird während der Prüfung mit einem Deckel und einem Spannring verschlossen. Als Anforderung ist zu erfüllen, daß nach 28 d auf der Probe kein Wasser steht.

Nach pr EN 445 /14/ und pr EN 447 /16/ wird das Wasserabsondern unabhängig von der Volumenänderung geprüft. Die in der pr EN 447 /16/ gestellte Anforderung an das Wasserabsetzen ist zur Beurteilung des Wasserabsonders unter baupraktischen Gesichtspunkten sinnvoller als die nach DIN 4227, T.5 /7/, da Hohlräume durch Wasseransammlungen vornehmlich in den ersten Stunden nach dem Verpressen entstehen. Es ist deswegen sinnvoll, das Wasserabsondern ebenfalls in den ersten Stunden der Erstarrung zu betrachten und nicht wie nach DIN 4227, T.5 nach 28 d. Nach pr EN 447 /16/ darf das Wasserabsondern 2 h nach Mischungsherstellung nicht mehr als 2,0 % betragen. Nach /54/ muß das abgesonderte Wasser innerhalb von 24 h nach Mischungsherstellung wieder vollkommen vom Mörtel aufgenommen sein (Tab. 2).

Als Prüfgefäß dient entweder ein Zylinder mit einem Durchmesser $d = 25 \text{ mm}$ und einer Höhe $h = 250 \text{ mm}$ oder ein Zylinder mit einem Durchmesser $d = 50 \text{ mm}$ und einer Höhe $h = 200 \text{ mm}$.

3.7.4 Volumenänderung

Nach DIN 4227, T.5 /7/ wird die Volumenänderung im sog. Absetzversuch an 3 Proben bestimmt. Die Gefäße haben einen Durchmesser $d = 100 \text{ mm}$ und eine Höhe $h = 120 \text{ mm}$. Sie sind während der Prüfung mit einem Deckel und einem Spannring verschlossen. Die Volumenänderung wird 24 h nach Mörtelherstellung geprüft.

Bei der Güteprüfung darf die Volumenverringerung maximal - 2,0 % betragen (Tab. 2).

Nach pr EN 445 /14/ und pr EN 447 /16/ wird die Volumenänderung ebenfalls 24 h nach Mörtelherstellung geprüft. Es werden jedoch schärfere Anforderungen an die Volumenänderung gestellt als nach DIN 4227, T.5. Die Volumenverringerung ist auf - 1,0 % beschränkt. Die maximale Volumenzunahme beträgt + 7,0 %. Als Gefäß dient entweder ein Zylinder d = 50 mm, h = 200 mm oder ein Zylinder d = 100 mm, h = 120 mm (Bild 3).

	DIN 4227, T.5	pr EN 445 pr EN 447
- Wasserabsondern	nach 28 d kein Wasser auf der Probe	nach 3 h max. 2,0 %
Prüfgefäß	d = 100 mm, h = 120 mm	d = 25 mm, h = 250 mm d = 50 mm, h = 200 mm
- Volumenänderung	nach 24 h max. 2,0 %	nach 24 h - 1,0 % ≤ ΔV ≤ +7,0 %
Prüfgefäß	d = 100 mm, h = 120 mm	d = 50 mm, h = 200 mm d = 100 mm, h = 120 mm

Tab.2: Vergleich der Prüfverfahren und Anforderungen bei Wasserabsondern und Volumenänderung nach DIN 4227 /7/ und pr EN 445 /14/ und pr EN 447 /16/

Obwohl die pr EN 445 und 447 /14/16/ zur Prüfung der Wasserabsonderung und der Volumenänderung geeigneter erscheinen als die DIN 4227, T.5 /7/, muß bezweifelt werden, daß die Prüfverfahren die praktischen Verhältnisse im Hüllrohr angemessen erfassen. Bei Druchlaufträgern sind Höhenunterschiede zwischen Hoch- und Tiefpunkt von mehreren Metern möglich. Dieses sollte bei der Festlegung von Prüfverfahren zur Wasserabsonderung und Volumenänderung berücksichtigt werden. Es ist deswegen fraglich, ob es nicht sinnvoller ist,

diese beiden Versuche mit Gefäßen durchzuführen, die eine größere Mörtelsäule gestatten (z.B. > 1,0 m).

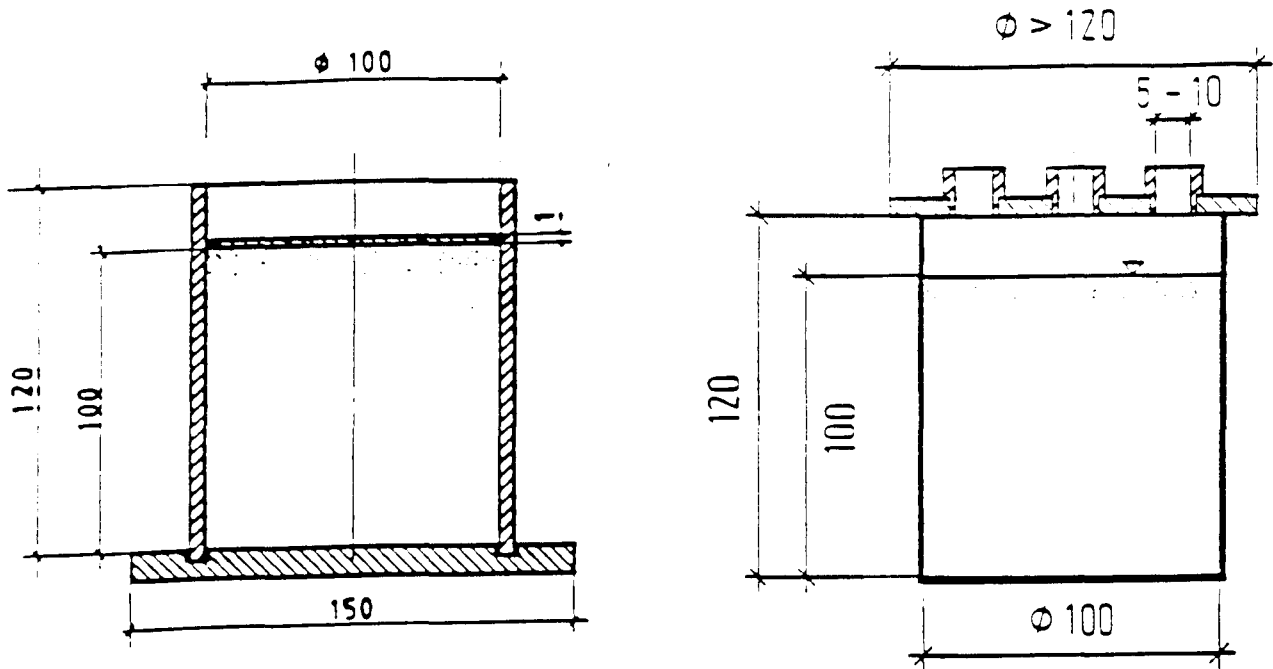


Bild 3: Volumenänderung nach dem Gefäßverfahren nach pr EN 445, aus /14/
 a) Abdeckplatte auf dem Mörtel
 b) Abdeckplatte auf dem Gefäß

3.8 Offene Fragen

3.8.1 Klinkerzusammensetzung

- Wie unterscheiden sich die mineralogischen und chemischen Eigenschaften gebräuchlicher Zemente für Einpreßarbeiten?
- Wie unterscheidet sich die Korngrößenverteilung von gebräuchlichen Zementen für Einpreßarbeiten? Versuche werden mit einem Lasergranulometer durchgeführt.
- Lassen sich Qualitätsanforderungen für Zemente formulieren, die sich zum Verpressen eignen?
- Es sollten Kriterien zur Eignungs- und Güteprüfung von Zementen für das Verpressen von Spanngliedern zusammengestellt werden.

- Kann für ausgewählte Mörtel exemplarisch eine Erhärtungs-Viskositätsfunktion aufgestellt werden?

3.8.2 w/z-Wert / Zusatzmittel

- Welchen w/z-Wert besitzt der Mörtel im Hüllrohr, wenn die Verpreßfront Restwasser vor sich herschiebt?
- Welche Zusatzmittel sind für das Verpressen von Spanngliedern besonders geeignet?
- Welche Anteile von FM sind sinnvoll? Ist durch den Einsatz von FM mit einem stärkeren Wasserabsondern zu rechnen?
- Welche Mengen LP wirken sich negativ auf die Mörtelporosität aus?
- Können bezüglich der Auswahl von Zusatzmitteln Erkenntnisse aus der Entwicklung von Mikrofeinzementen auf Einpreßmörtel übertragen werden?

3.8.3 Si-Zusatz

- Wie verändern sich die Eigenschaften des Mörtels (Wasserabsondern, Fließvermögen, Porosität) durch die Zugabe von Si-Staub im direkten Vergleich zu Mörteln ohne Si-Zusatz?
- Wie groß ist der Verlust der Alkalität bei der Zugabe von Si-Staub? Ist die Passivierung des Spannstahls gefährdet.

3.8.4 Eignungsversuche

- Wie ist das Wasserabsondern nach Normprüfung im Vergleich zu den Verhältnissen im Hüllrohr zu bewerten?
- Sind die Ergebnisse der Normversuche auf die Verhältnisse im Hüllrohr übertragbar? Kann die Wasserabsonderung und die Volumenänderung praxisnäher mit einem höheren Standgefäß (Mörtelsäule > 1,0 m) bestimmt werden? Ziel dabei ist, in Eignungsversuchen ähnliche hydraulische Bedingungen zu schaffen wie in girlandenförmig verlegten Spanngliedern.

4. HÜLLROHRE

4.1 Allgemeines

Heute werden bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund fast ausschließlich Stahlhüllrohre verwendet. Diese werden aus Bandstahl entweder mit gefalzter Wendelnaht oder mit geschweißter Längsnaht hergestellt.

Die Anforderungen an die Beschaffenheit von Hüllrohren aus Bandstahl für Spannglieder sind in der DIN 18553 /8/ zusammengestellt. Die Norm gilt für kreisrunde Hüllrohre mit wendelförmiger Profilierung bis zu 100 mm Nennweite. Im Rahmen der europäischen Normung wird diese Norm überarbeitet. Dabei ist 1989 zunächst ein neuer Entwurf für die DIN 18553 /9/ entstanden. An der Einführung auf europäischer Ebenen wird noch gearbeitet /10/.

Die Dicke des Bandstahls entscheidet über die Wandstärke des Hüllrohres. Zur Herstellung von Hüllrohren wird Bandstahl in Dicken von 0,2 - 0,40 mm verwendet /9/37/. Nach dem Entwurf der DIN 18553 /9/ ist aus Stabilitätsgründen in Abhängigkeit des Hüllrohrdurchmessers die Blechdicke zu verändern.

Die in der DIN 18553 /8/9/ gestellten Anforderungen im einzelnen:

- Biegeverhalten
- Verformungswilligkeit
- Querbelaastbarkeit
- Zugbelaastbarkeit
- Dichtheit
- Maßabweichung
- Bezogenes Profilvervolumen
- Verbindungsteile (Muffen)
- Verstärkungen

Einige dieser Punkte sind in bezug auf das Verpressen besonders wichtig. Im folgenden wird auf diese näher eingegangen:

4.2 Belastbarkeit

Um nennenswerte Deformationen der Hüllrohre während der Bauphase zu vermeiden, müssen Hüllrohre bestimmte Anforderungen bezüglich der Quer- und Zugbelastbarkeit sowie der Verformungswilligkeit erfüllen. Es wird dabei zwischen einem Anwendungsfall "voll" und "leer" unterschieden. Beim Anwendungsfall "voll" sind die Hüllrohre vor dem Betonieren des Bauteils mit dem Spannglied oder einer vergleichbaren Aussteifung gefüllt. Im Anwendungsfall "leer" werden die Spannstäbe erst nach dem Erhärten des Bauwerksbetons in das Hüllrohr eingeschoben.

Eine ausreichende Quersteifigkeit ist nach Norm gewährleistet, wenn bei einer definierten Prüflast nur eine Verringerung der lichten Weite von 5 mm /9/ bzw. 5 % /8/ auftritt (Bild 4). Größere Verformungen sind im Hinblick auf das Verpressen kritisch, da sie die Ursache für Verstopfer sein können.

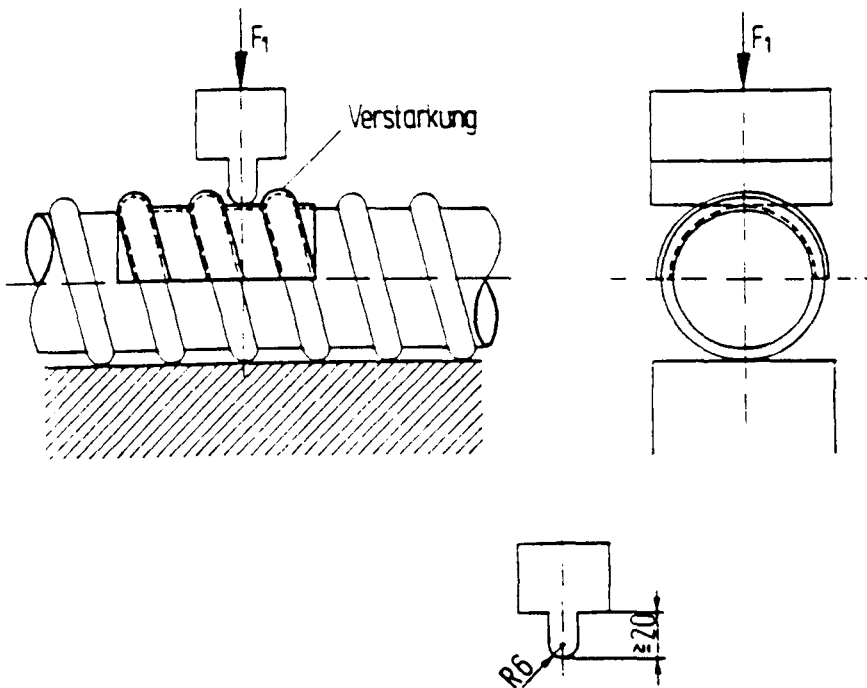


Bild 4: Prüfung der Querbelastbarkeit nach DIN 18553, aus /8/

Insbesondere beim Verlegen von vorgefertigten, schweren Spanngliedern besteht die Gefahr von Hüllrohreindrückungen /39/. Neuere Erkenntnisse zur Frage der Hüllrohrverformungen unter Baustellenbedingungen liegen nicht vor.

4.3 Dichtheit

Die Dichtheit wird nach Norm /8/9/ im Anschluß an das Biegeverhalten, die Verformungswilligkeit (Bild 5) und die Querbelaubarkeit geprüft. Die Dichtheit des Hüllrohres wird nach Norm mit dem Wasserdruckversuch an einem 1100 mm langen Hüllrohrstück geprüft. Dazu wird das Hüllrohr mit Wasser gefüllt und mit einem Druck von 0,5 bar beaufschlagt. Der Druck wird über einen Zeitraum von 5 min konstant gehalten. Innerhalb dieser Zeit darf der Wasserverlust nur 1,5 Vol. % betragen.

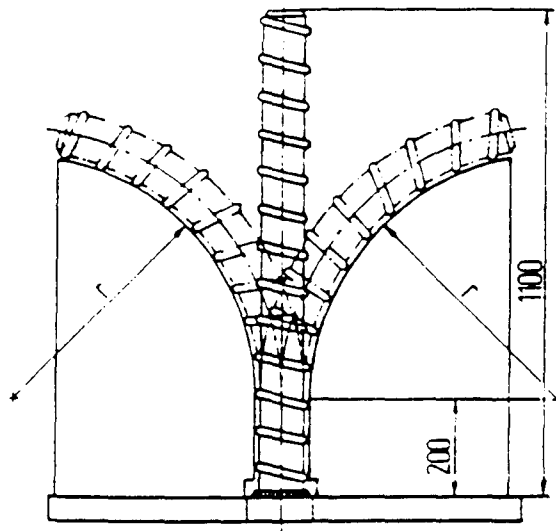


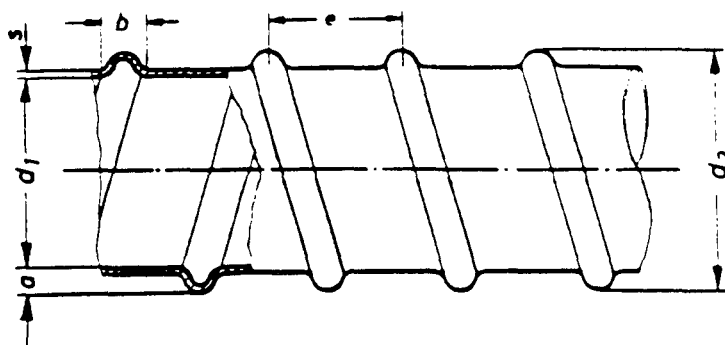
Bild 5: Prüfung der Verformungswilligkeit nach DIN 18553, aus /8/

Es muß jedoch bezweifelt werden, daß die unter Laborbedingungen ermittelte Dichtheit auf Bedingungen vor Ort übertragbar ist. In Schadensanalysen zeigt sich immer wieder, daß die verlegten Hüllrohre im Bauwerk nicht ideal dicht sind. Beschädigungen der Hüllrohre entstehen beim Betonieren des Bauwerkes u. a. infolge Hüllrohrverschiebung und bei zu kleinen Rüttellücken /2/39/. Als Folge von Hüllrohrbeschädigungen kann es sowohl zum Eindringen von Bauwerksbeton und Betonwasser in das Hüllrohr als auch zum Austreten von Einpreßmörtel in den Bauwerksbeton kommen, sofern eine Fehlstelle oder Undichtheit im Hüllrohr mit einem Kiesnest zusammenfällt.

Eine gute Dichtheit des Hüllrohres ist unabdingbar, weil es um eine zuverlässige Verfüllung geht. Sie ist insbesondere dann notwendig, wenn eine Mengenzuordnung des Einpreßmörtels aufgestellt werden soll.

4.4 Profilierung

Nach DIN 18553 /9/ muß mindestens ein bezogenes Profilvolumen von $0,08 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ vorhanden sein. Bei einer Hüllrohrnennweite größer 25 mm muß die Profilhöhe mindestens 2,5 mm betragen (Bild 6). Weitere Angaben zur Gestaltung und Größe der Sicken insbesondere bei großen Hüllrohrdurchmessern werden nicht gemacht.



- d_1 Nennweite
- d_2 Außendurchmesser
- a Profilhöhe
- b Profilbreite
- s Wanddicke
- e Steigung

Bild 6: Darstellung der Hüllrohrprofilierung, aus /9/

In der Literatur sind nur wenig Hinweise zur Gestaltung der Sicken zu finden. In /18/ wird berichtet, daß der Gestaltung der Sicken bei größeren Hüllrohrdurchmessern bis zum damaligen Zeitpunkt nicht angemessen Rechnung getragen wurde. In /18/39/ wird empfohlen, bei großen Hüllrohrdurchmessern eine ausreichend große Profilierung zu haben, damit sich aufsteigende Luftblasen und Sedimentationswasser dort sammeln können. Neuere Hinweise zur Profilierung der Hüllrohre sind nicht bekannt. Zur Zeit ist es gängige Praxis, für alle Hüllrohrdurchmesser die gleiche Sickenhöhe zu verwenden. Aufgrund des Hüllrohrdurchmessers wird die Forderung nach dem erforderlichen bezogenen Profilvolumen eingehalten.

Im Rahmen der Forschungsarbeit könnte anhand von Versuchen untersucht werden, welche Profilierung und Sickengröße in Abhängigkeit des Hüllrohrdurchmessers

sinnvoll ist, um aufsteigendes Wasser und Luftblasen vom Spannstahl fern zu halten.

4.5 Verbindungsteile

An die Verbindungsteile sind nach DIN 18553 /8/9/ die gleichen Anforderungen zu stellen, wie an das Hüllrohr (s.o.). Nach DIN 4227, T.1 sind Hüllrohrstöße abzudichten /6/. Dieses geschieht üblicherweise mit Klebeband. Es muß jedoch bezweifelt werden, daß die so hergestellten Hüllrohrstöße unter Baustellenbedingungen die gleichen Dichtigkeitsanforderungen erfüllen können wie Hüllrohre unter Laborbedingungen. In /42/ wird über Versuche über das Schließen von Hüllrohrstößen berichtet. Neben Klebeband wurden die Stöße mit Schrumpfschläuchen abgedichtet. Dabei handelt es sich um thermoplastische Kunststoffe, die ursprünglich für die Elektrotechnik zur Abdichtung von Kabelstößen entwickelt wurden. Bei den mit Schrumpfschläuchen abgedichteten Hüllrohrstößen konnte in den Versuchen eine weitaus bessere Dichtigkeit erzielt werden als mit den Abdichtungen mit Klebeband.

In gleicher Weise ist auch der Übergang des Hüllrohres an die Trompete des Ankers problematisch.

4.6 Kunststoffhüllrohre

In der jüngsten Zeit laufen vermehrt Bestrebungen, bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund neben Stahlhüllrohren auch Kunststoffhüllrohre einzusetzen /38/42/. Ein solches Kunststoffhüllrohr ist in Bild 7 dargestellt. Bei Spanngliedern ohne Verbund ist der Einsatz von Kunststoffhüllrohren weit verbreitet. Es werden überwiegend Kunststoffhüllrohre aus Polyethlen (PE) oder Polypropylen (PP) verwendet.

Bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund verspricht die Verwendung von Kunststoffhüllrohren einen besseren Korrosionsschutz des Spannstahls als mit Stahlhüllrohren. Kunststoffhüllrohre werden durch übliche physikalische und chemische Belastungen (Feuchtigkeit, Chloride) kaum angegriffen. Außerdem ist durch Kunststoffhüllrohre eine elektrolytische Entkopplung von Spannstahl und umgebenden Bauwerksbeton möglich /38/49/50/26/. In /42/ wird über umfang-

reiche Versuche an Kunststoffhüllrohren im Vergleich zu Stahlhüllrohren berichtet. In bezug auf die Cl-Eindringung ist der Spannstahl bei der Verwendung von Kunststoffhüllrohren um ein vielfaches besser geschützt als bei Stahlhüllrohren.

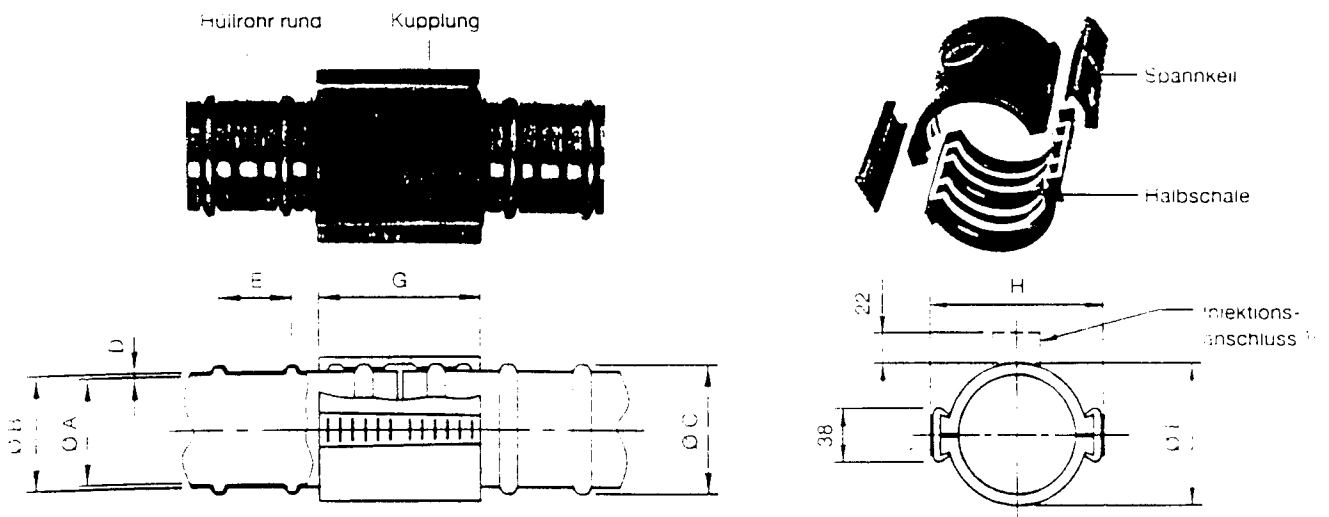


Bild 7: Kunststoffhüllrohr PT-Plus-System, VSL

Es fällt auf, daß bei Kunststoffhüllrohren heute bereits ein höherer Standard in bezug auf die Dichtheit von ganzen Spanngliedern erreicht ist als bei Stahlhüllrohren. Durch das Verschweißen der Muffen (Verschweißmuffen) kann bei Kunststoffhüllrohren eine vollständige Dichtigkeit erreicht werden. Dieses wird bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund erfolgreich praktiziert.

Im Rahmen der Forschungsarbeit soll dem generellen Nutzen von Kunststoffhüllrohren nicht gezielt nachgegangen werden. Dennoch bietet sich der Einsatz von Kunststoffhüllrohren bei der Erprobung von Meßsystemen zur Volumen- und Mengenmessung an.

5. KONSTRUKTION

5.1 Allgemeines

Aus den Ergebnissen von Verpreßversuchen an großen und langen Spanngliedern liegen Erkenntnisse darüber vor, mit welchen konstruktiven Maßnahmen die Qualität der Spanngliedverpressung verbessert werden kann. Es handelt sich um Hinweise bezüglich der maximalen Spanngliedneigung, der Anordnung von Ein- und Austrittsöffnungen sowie der Einpreß- und Nachpreßrichtung. Einen guten Überblick geben /18/19/21/41/54/57/58/. In folgenden wird nur auf die wesentlichen Punkte kurz eingegangen.

5.2 Rohrhydraulik

Die Fließbedingungen des Mörtels im Hüllrohr sind für eine gute Verfüllung des Spanngliedes entscheidend. Durch das Spannen der Spannglieder steht dem Mörtel an Tiefpunkten der untere, an Hochpunkten der obere Hüllrohrquerschnitt zur Verfügung (Bild 8). Zusätzlich sorgen Verzopfungen der Litzen bzw. Einzeldrähte für eine ständige Änderung des durchströmten Querschnitts.

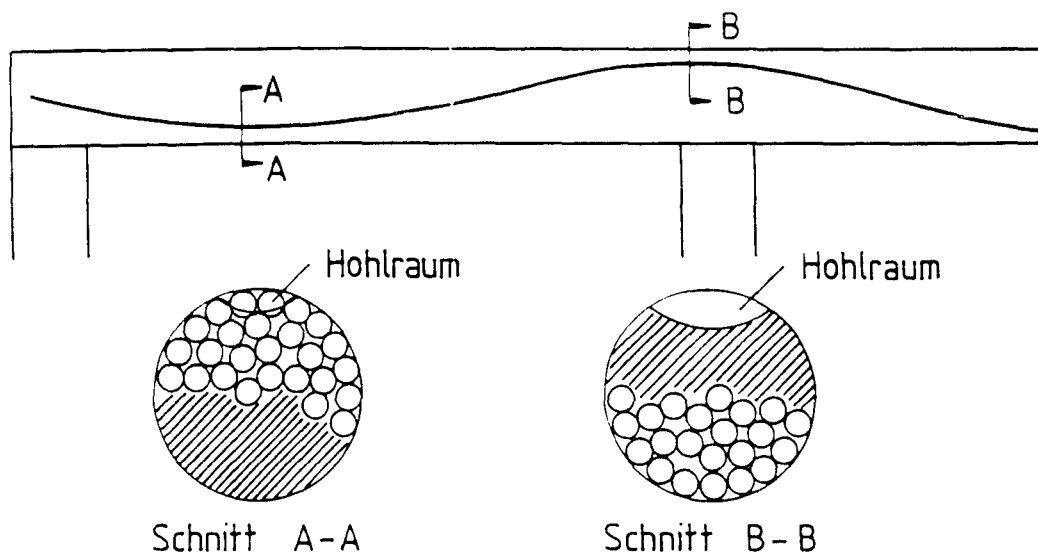


Bild 8: Lage des Spannstahls im Hüllrohr am Hoch- und Tiefpunkt, aus /42/

Um einen guten Korrosionsschutz zu gewährleisten, muß der Mörtel auch zwischen die einzelnen Litzen bzw. Einzeldrähte gelangen. Das bedingt eine gute Querläufigkeit.

5.3 Umlenkstellen

An Umlenkstellen des Spannglieds liegen die Spannstähle im gespannten Zustand am Hüllrohr an. An der Krümmungsinnenseite ist deswegen keine vollständige Umhüllung der Litzen möglich. In der Literatur sind unterschiedliche Aussagen zur Umhüllung des Spannstahls an der Krümmungsinnenseite zu finden. Bei gerippten Ovalstäben waren auch im Bereich von Krümmungen bei engster Packungsdichte alle Zwischenräume gut verfüllt /39/. Demgegenüber waren bei einem anderen Bauwerk an der Krümmungsinnenseite Druckstellen am Hüllrohr zu erkennen. Die Stahloberflächen waren nur mit einer dünnen Zementleimschicht bedeckt. Am Spannstahl wurden leichte Korrosionserscheinungen festgestellt /28/.

Es ist darauf zu achten, daß Auflagerpunkte der Hüllrohre ausreichend steif sind. Diese ist besonders bei der Verlegung von Fertigspanngliedern von Bedeutung. Ihre relativ hohe Eigengewichtslast muß bereits vor dem Betonieren des Bauteils sicher abgetragen werden.

Weiterhin ist darauf zu achten, daß die Hüllrohre gut mit der schlaffen Bewehrung verbunden sind, um ein Verschieben während des Betonierens und Rüttelns zu vermeiden /2/41/.

5.4 Gezielte Ordnung der Spannglieder

Bei einigen Spannverfahren mit Einzeldrähten werden letztere bei großer Drahtzahl durch eine innenliegende Wendel geordnet. Ziel ist eine allseitige Umhüllung der Drähte. Durch die innenliegende Wendel entsteht ein zweiter Fließquerschnitt in der Mittelachse des Spannglieds. Teilweise werden an Umlenkstellen Abstandhalter angeordnet, um eine gezielte Ordnung der einzelnen Spannstähle zu erreichen.

Es muß überlegt werden, ob es sinnvoll ist, durch eine gezielte Ordnung die Verzopfung der Litzen zu vermeiden. Außerdem könnte durch die Anordnung von Abstandhaltern eine bessere Querläufigkeit des Mörtels erreicht werden (Spannglieder ohne Verbund). Das Ziel ist die Verminderung des Drainageeffektes bei gleichzeitiger Verbesserung der Spannstahlumhüllung.

5.5 Spanngliedneigung

Wird bei Durchlaufträgern nur von einer Seite aus verpreßt, fließt der Mörtel auch vom Hoch- zum Tiefpunkt. Bei abwärts geneigter Fließrichtung steht die Mörtelsäule partiell unter einem verminderten Druck oder ist sogar drucklos. Vielmehr stellt sich ein Freispiegelgerinne ein. Eine vollständige Verfüllung des Spannglieds ist nicht von vornherein sichergestellt. Dieses ist exemplarisch in Bild 9 dargestellt. Bei einer Neigung größer 1 : 4 sollte deswegen in einem zweiten Vorgang gegengepreßt werden /18/.

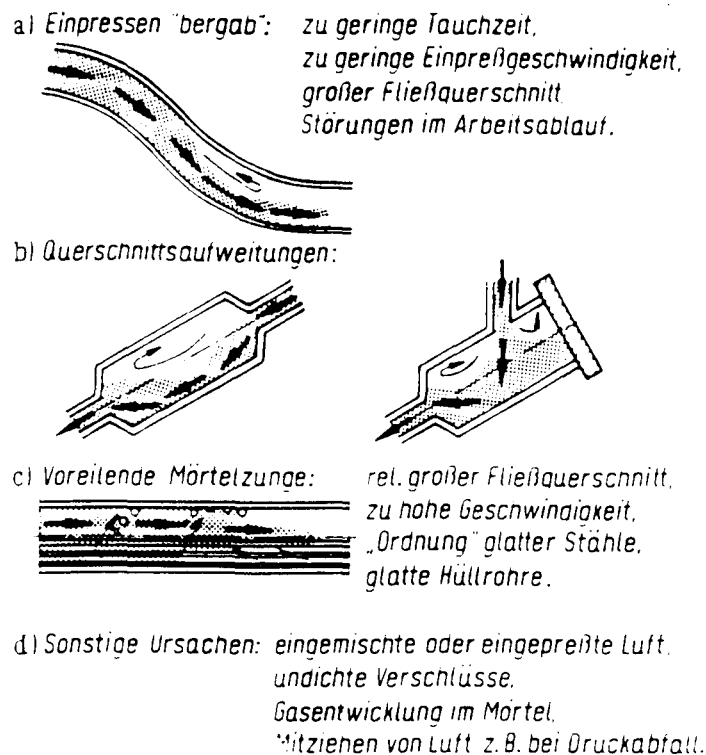


Bild 9: Mögliche Fehlstellen bei abwärts geneigtem Mörtelfluß, aus /19/

Auch das Verpressen von vertikalen Spanngliedern bereitet oft Probleme. Bei vertikalen Spanngliedern wird der Mörtel vom Tiefpunkt aus eingepreßt. Dennoch verbleiben oft unter den oberen Ankerplatten Hohlräume /29/. Diese können gezielt nachverpreßt werden, sofern zusätzliche Einfüllöffnungen in der Nähe des Ankers vorgesehen sind (Bild 10). Die Anordnung von zusätzlichen Ein- und Auslauföffnungen wird empfohlen /19/21/.

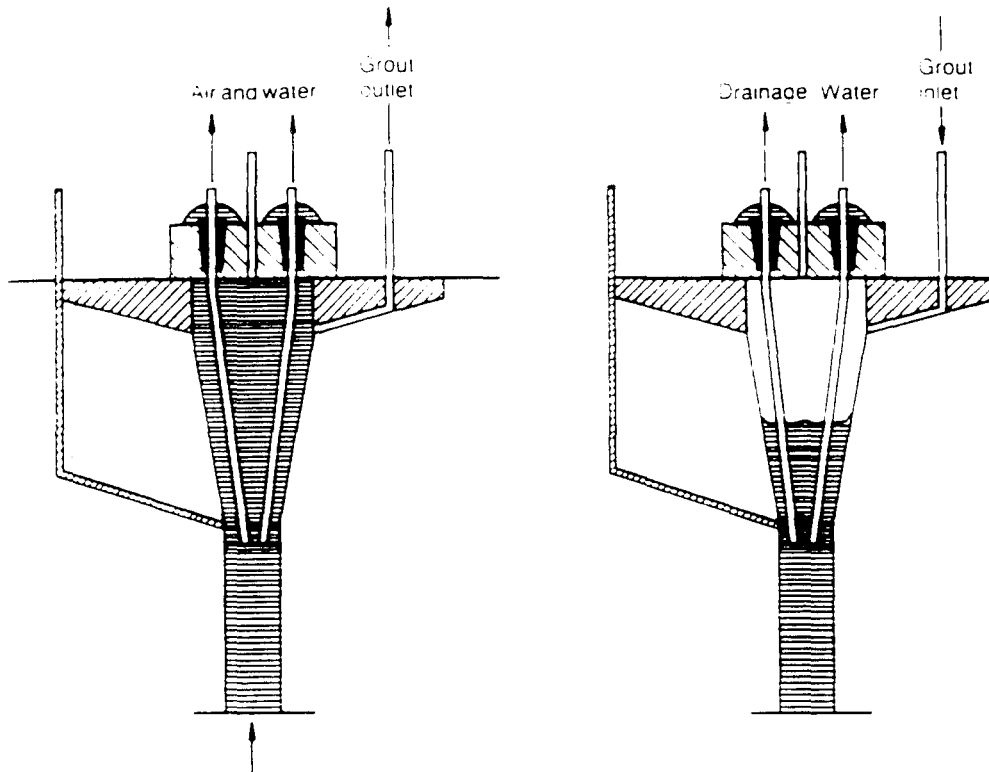


Bild 10: Zusätzliche Ein- und Auslauföffnungen am oberen Ende von vertikalen Spanngliedern, aus /21/

5.6 Hüllrohr/Spannstahl-Verhältnis

Die Größe des Fließquerschnitts ist für eine gute Hüllrohrinjektion von großer Bedeutung. Der Fließquerschnitt wird vom Hüllrohr/Spannstahl-Verhältnis bestimmt.

Bei einem zu kleinen Hüllrohr/Spannstahl-Verhältnis ist der Fließquerschnitt sehr klein. Eine ordnungsgemäße Verfüllung ist nicht gesichert. Es kann zum Drainageeffekt kommen, wenn Wasser durch enge Zwickel aus dem Mörtel ausgepreßt wird. In der Vergangenheit sind vermehrt Korrosionsschäden an Spanngliedern mit Einzelstäben aufgetreten. Grund dafür war, daß der

Hüllrohrdurchmesser nur geringfügig größer war als der Stabdurchmesser. Der zu kleine Fließquerschnitt führte zu Verstopfern und somit zu unvollständig verfüllten Hüllrohren. Durch den zu geringen Spalt zwischen Einzelstab und Hüllrohr war außerdem die Mörtelüberdeckung nicht ausreichend.

Bei einem überproportionalen Anstieg des Hüllrohr/Spannstahl-Verhältnisses wird der zu verpressende Querschnitt größer. Ein größerer Verpreßquerschnitt fördert jedoch die Sedimentationsneigung. Hohlräume durch aufsteigende Luftblasen und Blutwasser sind die Folge.

Ziel ist deswegen ein möglichst ausgewogenes Hüllrohr/Spannstahl-Verhältnis. Im FIP-Guide /21/ wird ein Hüllrohr/Spannstahl-Verhältnis von 2 - 2,5 empfohlen.

5.7 Ein- und Austrittsöffnungen

Generell sollen Spannglieder aufsteigend, d.h. vom Tiefpunkt zum Hochpunkt verpreßt werden. Bei mehrfeldrigen Trägern bedingt dies Einfüllöffnungen am Tiefpunkt und Austrittsöffnungen am Hochpunkt /18/19/. Nach ZTV-K 80 und 88 /57/58/ müssen an Hochpunkten und an Koppelstellen stets Entlüftungen angeordnet werden; an Tiefpunkten sollten nach Möglichkeit Entwässerungen angeordnet werden. Zur Vereinfachung der Bauverfahrenstechnik (Vorschubrüstung) wird auf Ein- oder Auslauföffnungen an den Tiefpunkten meist verzichtet. In Bild 11 sind einige Beispiele für die Anordnung von Ein- und Austrittsöffnungen dargestellt.

Es wird weiterhin empfohlen, an Hochpunkten, bei geneigten Ankern und an Koppelstellen neben einer Entlüftung eine weitere Einfüllöffnung anzuordnen, um diese Stellen gezielt nachverpressen zu können /21/38/. Die exemplarische Anordnung von Ein- und Austrittsöffnungen ist in Bild 12 dargestellt.

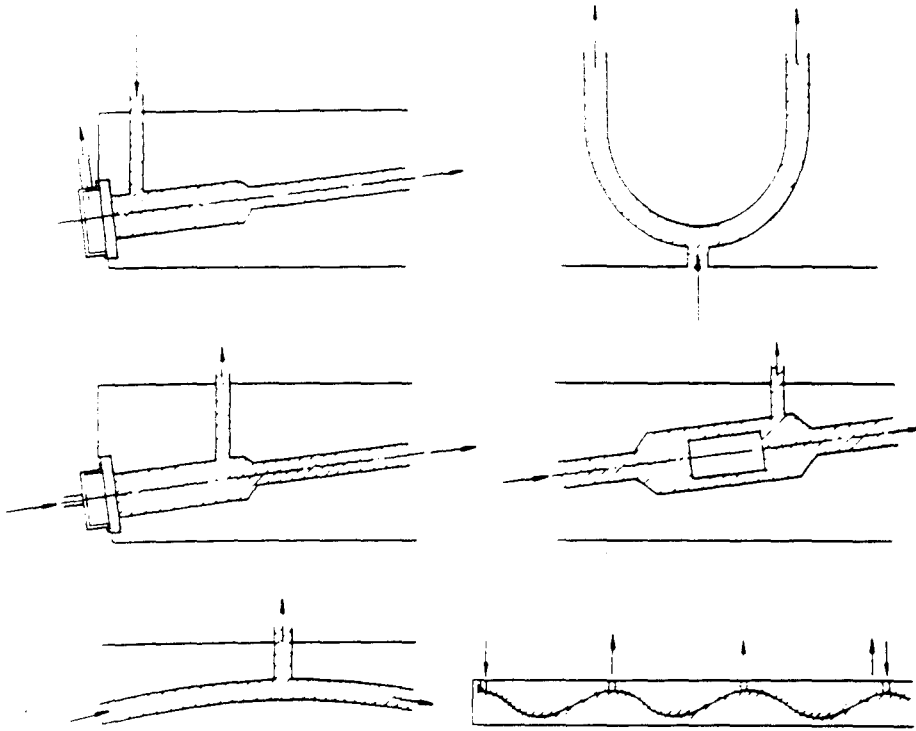


Bild 11: Beispiele für Ein- und Auslauföffnungen, aus /21/

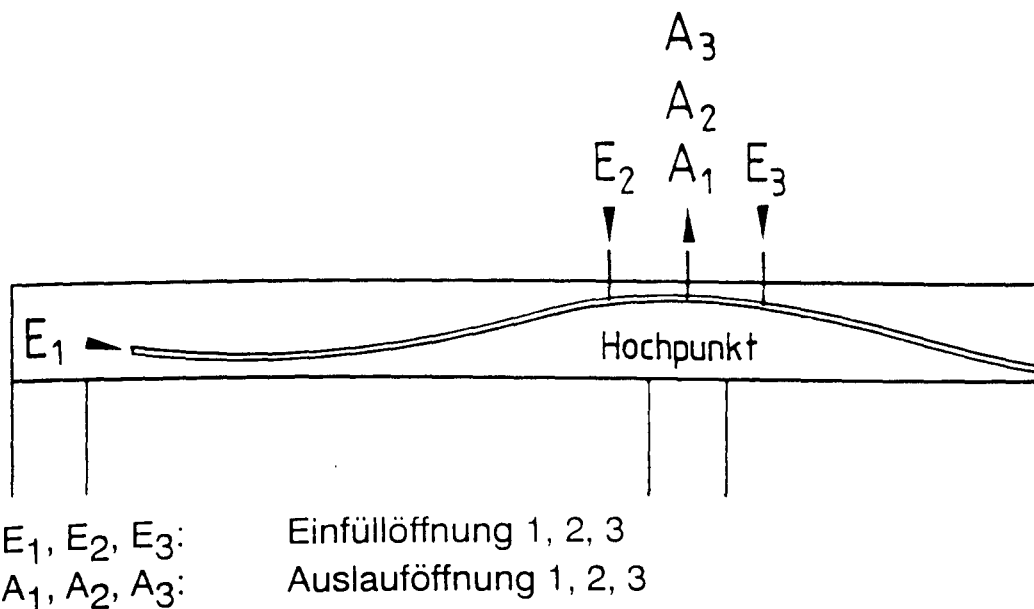


Bild 12: Zusätzliche Einpreßöffnung zum Nachverpressen des Hochpunktes

Für die Reihenfolge der Verpreßrichtung ist ein detaillierter Verpreßplan aufzustellen (Bild 14). Wird von einer Zwischenentlüftung weiterverpreßt, muß der Einpreßschlauch vor dem Ansetzen der Pumpe vollständig mit Mörtel gefüllt sein. Andernfalls wird eine Luftblase in das Hüllrohr injiziert.

In /18/21/ sind weitere Angaben zur Anordnung von Ein- und Austrittsöffnungen zu finden.

5.8 Verengungen

Verengungen des Hüllrohrquerschnitts behindern den Mörtelfluß. Vor einer Verengung wird die Fließgeschwindigkeit reduziert. Gleichzeitig steigt der Druck an. Hinter der Verengung fällt der Druck ab. Infolge des Druckanstiegs kann es zum Drainageeffekt kommen. Sedimentation und Verstopfer sind die Folgen /1/.

Die wesentlichen Ursachen für Verengungen des Fließquerschnitts sind:

- Mörtelreste im Hüllrohr
- eingedrungenen Bauwerksbeton infolge undichter Hüllrohre
- eingedrückte Hüllrohre

Verengungen können vor der Hüllrohrinjektion durch eine Durchgängigkeitsprüfung mit Druckluft (s.o.) aufgefunden werden.

5.9 Aufweitungen

Koppelstellen sind nach /18/ wie Hochpunkte zu betrachten und mit entsprechenden Entlüftungen zu versehen. Die Anordnung der notwendigen Ein- und Auslauföffnungen zeigt Bild 11.

Koppelstellen und Trompeten stellen eine Aufweitung des Hüllrohrquerschnitts dar. Sie sind i.d.R. gegen die Horizontale geneigt. Beim Übergang der Mörtelfront vom Hüllrohrquerschnitt in eine Aufweitung kommt es zur Druckentspannung des Mörtels. Eine vollständige Verfüllung eines solchen Punktes ist schwierig. Wie im Bild 13 zu sehen, kann es ansonsten zu Fehlstellen kommen. Nach /18/21/ sind Koppelstellen wie Hochpunkte zu betrachten und mit entsprechenden Entlüftungen zu versehen.

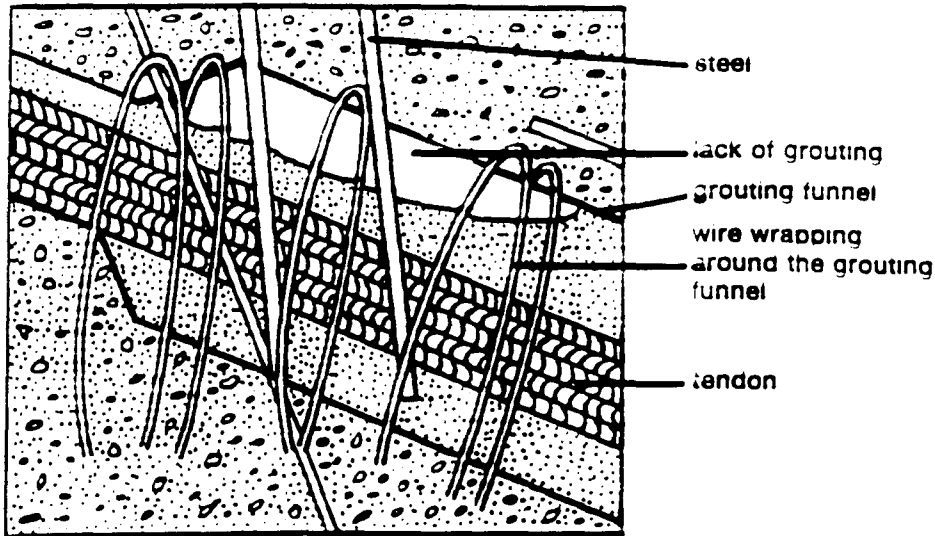


Bild 13: Fehlstellen in Ankern und Koppelstellen bei fehlender Entlüftung, aus /42/

Zur Vermeidung von toten Ecken sollen Aufweitungen stets von unten nach oben verfüllt werden /7/18/21/. Zum Entweichen der Luft muß am oberen Punkt der Aufweitung eine Entlüftung angeordnet werden (Bild 11). Auf diese Weise ist das Entweichen der Luft nach oben gewährleistet.

5.10 Offene Fagen

Bezüglich der Spanngliedanordnung im Bauwerk scheinen folgende Punkte einer weiteren Klärung zu bedürfen:

- Wo werden Ein- und Austrittsöffnungen optimal angeordnet?
- Wie groß ist die maximale Spanngliedneigung, um eine einwandfreie Verfüllung zu erreichen? Welchen Einfluß haben die Fließbedingungen?
- Hoch- und Tiefpunkt
 - Kann Wasser an Tiefpunkten ausgeblasen werden?
 - Wie können Hochpunkte unter Berücksichtigung der verwendeten Mörtel optimal verfüllt werden?
- Wie gelingt ein optimales Nachverpressen von
 - Hochpunkten
 - Koppelstellen und Verankerungen?

6. MASCHINENTECHNIK

6.1 Allgemeines

Die Qualität der Verpressung hängt neben dem Mörtel und den Hüllrohren auch von den verwendeten Maschinen ab. Bei den Mixern ist die Drehzahl ausschlaggebend für einen homogenen Mörtel. Die Einpreßpumpe ist in Verbindung mit den Zuleitungsschläuchen für die Füllung der Hüllrohre verantwortlich. Während in der DIN 4227, T.5 /7/ nur gesagt wird, daß Mixer und Einpreßpumpe auf die Erfordernisse des Spannverfahrens abzustimmen sind, werden in pr EN 446 /15/ und in /21/ detaillierte Anforderungen zu eben diesen Maschinen formuliert.

6.2 Mörtelmischer

Die Eigenschaften des Frischmörtels werden neben der Zementzusammensetzung vom Mischprozeß beeinflusst. Entscheidend ist dabei die Drehzahl des Mixers. Bei den Mixern werden zwei verschiedene Arten unterschieden. Die einen mischen mit Drehzahlen von 1.000 U/min, die anderen sind hochoberige Mixer, die mit 1.500 U/min betrieben werden /21/. Injektionsmörtel auf Mikrozementbasis werden mit Mixern bis zu 10.000 U/min hergestellt. Die Vorteile der hochoberigen Mixer sind,

- bessere Homogenisierung des Mörtels
- dadurch geringere Neigung zum Wasserabsetzen
- geringe Neigung zur Klumpenbildung.

6.3 Einpreßpumpen

Für die Einpreßarbeiten werden Kolbenpumpen, Schneckenpumpen oder Membranpumpen verwendet. Bei Kolbenpumpen muß darauf geachtet werden, daß ein kontinuierlicher Mörtelfluß gewährleistet ist. Dieses kann durch den Einsatz einer Doppelkolbenpumpe erreicht werden. Nach DIN 4227 T.5 /7/ muß die Pumpe so beschaffen sein, daß kontinuierlicher Mörtelstrom gesichert ist. Jeder Spannkanal ist ohne Unterbrechung zu füllen.

Ein diskontinuierlicher Mörtelfluß ist nachteilig beim Verpressen langer Spannglieder. In /35/ wird über das Verpressen eines 30 m langen Spanngliedes berichtet. In Rahmen des Versuches wurde eine 8 m lange Mörtelsäule nach 30 min wieder in Gang gesetzt. Es muß bezweifelt werden, daß Mörtel bei noch längeren Spanngliedern nach einem Stillstand wieder in Gang gesetzt werden kann.

Um für zusätzliche Sicherheit beim Verpressen zu sorgen, sollten alle notwendigen Geräte, wie Mischer und Einpreßpumpe, auf der Baustelle redundant vorhanden sein /10/. Außerdem sollen zur Beseitigung von Verstopfern ständig Druckwasser und Druckluft auf der Baustelle vorhanden sein /10/.

6.4 Durchfluß- / Mengenmessung

Man geht heute davon aus, daß das Spannglied dann vollständig verpreßt ist, wenn Mörtel an der Austrittsöffnung austritt. Für eine zuverlässige Beurteilung der Hüllrohrverfüllung scheint dieses jedoch unzureichend. Erst wenn es gelingt, das zu verfüllende Volumen und die Einpreßmenge zu quantifizieren, ist eine Aussage zur Verfüllung des Spanngliedes möglich. Ziel ist eine Mengenbilanz von dem zu verpressenden Volumen und der Ist-Einpreßmenge während der laufenden Arbeit. Eine genaue und zuverlässige Bestimmung des zu verpressenden Volumens und Einpreßmenge ist jedoch unter Baustellenbedingungen schwer realisierbar.

Für die Bestimmung des zu verpressenden Volumens reicht eine Betrachtung auf geometrischer Basis allein nicht aus. Die Länge eines auf der Baustelle gefertigten Hüllrohres samt Zusatzbauteilen stimmt ggf. nicht exakt mit der nach Plänen ermittelten Länge überein. Bei der Ermittlung des zu verpressenden Volumens muß auch das Volumen der Ein- und Auslauföffnungen berücksichtigt werden.

Außerdem ist, wie bereits erwähnt, nicht damit zu rechnen, daß die Hüllrohre in jedem Fall ideal dicht sind. Ist Bauwerksbeton in das Hüllrohr eingedrungen, ist das zu verpressende Volumen geringer als das auf geometrischer Basis ermittelte Volumen. Bei einer Hüllrohrrundichtheit ist das zu verpressende Volumen größer als das geometrisch ermittelte Volumen, wenn

Injektionsmörtel in das umgebende Bauwerk eindringen kann. Dieses ist insbesondere bei Kiesnestern der Fall.

Wenn infolge von Kiesnestern mit einer Querläufigkeit des Mörtels zwischen den einzelnen Spanngliedern zu rechnen ist, sollten benachbarte Spannglieder nicht aufeinanderfolgend verpreßt werden /29/. Zur Qualitätssicherung sollte generell ein Verpreßplan aufgestellt werden.

Zur Bestimmung des zu verpressenden Volumens ist das Vakuumverfahren geeignet. Durch das Aufbringen eines Vakuums wird anhand der abgesaugten Luftmenge das zu verpressende Volumen bestimmt. Das Verfahren ist allerdings zeit- und kostenaufwendig.

Demgegenüber ist die Ermittlung der **Ist-Einpreßmenge** weniger kompliziert. Das genaue Messen und Protokollieren der Mörtelstände im Vorratsbehälter stellt die einfachste Möglichkeit zur Bestimmung der Einpreßmenge dar.

Eine Weiterentwicklung ist der Einsatz von Durchflußmessern. Da es sich bei Mörtel um ein elektrolytisches Medium handelt, können induktive Durchflußmesser eingesetzt werden /20/33/. Der Vorteil dieser Durchflußmesser liegt darin, daß keine beweglichen Teile im Rohrquerschnitt erforderlich sind. Die Meßgeräte sind robust und leicht zu reinigen. Schachtbau/Nordhausen hat eine einsetzbare Gerät entwickelt. Die Anwendung wurde an der Edertalsperre erprobt.

7. VERPRESSARBEIT

7.1 Allgemeines

Das Verpressen von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund erfolgt nach DIN 4227 T.5 /7/. Darin sind überwiegend Anforderungen und Prüfverfahren für die Einpreßmörtel festgelegt. Im Rahmen der europäischen Normung ist die pr EN 446 /15/ entstanden, die sich mit Einpreßverfahren beschäftigt. Ergänzend dazu gelten für Verpreßarbeiten die Richtlinien nach EC 2, Kap. 6.3.4 /10/. Darüber hinaus enthält auch der FIP-Guide /21/ Richtlinien für die Verpreßarbeit. Derartige Richtlinien tragen zur Verbesserung der Spanngliedverpressung bei.

7.2 Hüllrohrinspektion

Die Durchgängigkeit des Hüllrohres ist Voraussetzung für eine vollständige Füllung des Hüllrohres mit Mörtel. Bei nicht oder schlecht durchgängigen Hüllrohren liegt i.d.R. eine lokale Querschnittsminderung vor. Diese ist die Folge von Hüllrohrbeschädigungen (Eindellungen) oder Mörtel- bzw. Betonresten im Hüllrohr. Insbesondere bei undichten Hüllrohren kann beim Betonieren Bauwerksbeton in das Hüllrohr eindringen und zu Querschnittsverminderung führen. Darüber hinaus können Mörtel- bzw. Betonreste beim Einfädeln des Spannstahls Schäden an der Spannstahloberfläche verursachen. Durchgängigkeit und Dichtigkeit des Hüllrohres sollen deshalb sichergestellt sein.

7.2.1 Dichtheit

Die Dichtheit des Hüllrohres wird unter Laborbedingungen geprüft. Gleichwohl sind Zweifel an die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Baustellenbedingungen angebracht (s.o.). In Analogie zu den Dichtheitsanforderungen unter Laborbedingungen müßten entsprechende Anforderungen unter Baustellenbedingungen entwickelt werden. Auf diese Weise ließen sich Unsicherheiten bei der Dichtheit an Hüllrohrstößen ausschließen. Die geltenden Normen (DIN 4227, T.5; pr EN 446; EC 2) sind in dieser Hinsicht unzureichend.

Insbesondere wenn vor dem Verpreßvorgang das tatsächlich zu verpressende Volumen bestimmt werden soll, müssen hohe Anforderungen an die Dichtheit des Hüllrohres gestellt werden.

Das zu verpressende Volumen kann bestimmt werden, in dem das Hüllrohr vor dem Verpressen mit Luft oder Wasser gefüllt wird und der Druckabfall registriert wird. Das Hüllrohr wird wie eine Gasleitung abgedrückt (Stichwort Gasdetektoren /37/). Die breite Anwendung eines derartigen Verfahrens ist nicht bekannt.

Im Pipelinebau ist es üblich, die Dichtigkeit der Rohrverbindung in situ zu prüfen. Dazu wird der zu prüfende Rohrabschnitt unter Innendruck gesetzt und der zeitabhängige Druckabfall registriert. Die Dichtigkeitsanforderung wird über den Druckabfall formuliert. Vorteil des Verfahrens ist, daß das gesamte Rohr geprüft wird. Auf diese Weise können Fehlstellen an Schwachpunkten (Verbindungsstücke, Muffen) lokalisiert werden /37/. Im Rahmen der Forschungsarbeit kann die Anwendbarkeit einer solchen Methode geprüft werden.

7.2.2 Durchgängigkeit

Vor dem Verpressen muß die Durchgängigkeit der Hüllrohre geprüft werden /7/. Dieses geschieht entweder mit Wasser oder mit Luft. In der ZTV-K 80 /57/ wird gefordert, die Durchgängigkeit der Hüllrohre mit Wasser zu prüfen.

Als wesentliche Gründe für eine Wasserspülung gelten:

- Prüfung der Durchgängigkeit
- Vornässen des Spanngliedes, um Verstopfern vorzubeugen
- Abtransport von Schmutz aus dem Spannkanal
- Entfernen von Blutwasser, das beim Betonieren eingedrungen sein kann.

Das Spülen der Hüllrohre vor dem Verpressen ist jedoch problematisch, da oft erhebliche Wassermengen im Hüllrohr zurückbleiben /39/. Der Injektionsmörtel ist jedoch nur in der Lage, relativ geringe Wassermengen ohne Bildung von Fehlstellen aufzunehmen. An der Mörtelfront wird der w/z-Wert unkontrolliert vergrößert. Das zurückbleibende Restwasser sammelt sich beim Verpreßvorgang an den Hochpunkten und verursacht Hohlräume.

Es wird daher empfohlen, die Wasserspülung nur noch bei der Beseitigung von Verstopfern einzusetzen /41/.

Die Wasserverdrängung durch das Einpressen von Mörtel ist auch bei Verwendung des Vakuumverfahrens sehr eingeschränkt /29/. Dazu wurden Versuche an senkrechten Spanngliedern mit kleinem Durchmesser und wenigen Litzen durchgeführt. Das durch viele Litzen verursachte Drainageproblem wurde bei diesen Versuchen nicht erfaßt.

Die Prüfung der Durchgängigkeit sollte deswegen anstatt mit Wasser mit Luft durchgeführt werden. Dieses wird auch vom Sachverständigenausschuß "Spannverfahren" empfohlen. Hüllrohre sollten nur in Ausnahmefällen mit Wasser gespült werden, z.B. zur Beseitigung von Verstopfern. In diesen Fällen ist das Hüllrohr anschließend mit Luft auszublasen, um das Restwasser auszutreiben /7/. Es muß jedoch bezweifelt werden, daß auch an Hüllrohrtiefpunkten das Wasser vollständig ausgeblasen werden kann.

Zum Auffinden von größeren Restwassermengen könnten Feuchtedetektoren eingesetzt werden /37/. Größere Restwassermengen könnten ggf. abgesaugt werden. Die Zulassung des Spannverfahrens gibt Auskunft, ob das Spülen mit Wasser generell erlaubt ist.

Die Bedingungen im Hüllrohr (Dichtigkeit, Durchgängigkeit, Verzopfung der Spannstäbe) können vor dem Verpressen mit Hilfe eines Endoskopes untersucht werden. Flexible Videoendoskope ermöglichen den Einblick in ein Rohr bis zu 30 m. Die Anwendbarkeit dieses Verfahren kann im Rahmen des Forschungsvorhabens näher untersucht werden.

7.3 Mischen des Mörtel

Die Reihenfolge für die Zugabe der Mörtelbestandteile sowie die maximale Mischdauer richtet sich nach dem verwendeten Mischer /21/:

- bei einem niedertourigen Mischer soll zunächst das Wasser, dann 2/3 des Zementes, dann das Zusatzmittel und schließlich der Rest Zement zugegeben werden; Mischdauer max. 4 min; übliche Mischdauer 1 - 4 min.

- bei einem hochtourigen Mischer soll das Wasser, dann der Zement und schließlich das Zusatzmittel zugegeben werden; Mischdauer max. 2 min; übliche Mischdauer 30 sec - 2 min.

Nach dem Mischen wird der Mörtel in einen Vorratsbehälter gegeben und weiter durch leichtes Rühren (100 U/min) in Bewegung gehalten. Auf diese Weise wird die Sedimentationsneigung reduziert. Um ein vorzeitiges Ansteifen des Mörtels zu vermeiden, soll die Mörteltemperatur nach dem Mischen $T = 35 - 40^{\circ}\text{C}$ nicht überschreiten /1/21/.

Vor dem Einfüllen des Mörtels in den Vorratsbehälter ist der Mörtel durch ein Sieb mit 2 mm Maschenweite zu pressen, um Klumpen im fertigen Mörtel auszuschließen. Beim Swibo-Mischer /1/ wird der Zement zur Vermeidung der Klumpenbildung durch einen 2 mm breiten Spalt in den Mischer eingeblasen. Dieses Verfahren gewährleistet bereits während des Mischvorgangs eine gute Homogenisierung des Mörtels.

7.4 Einpreßgeschwindigkeit

Die Einpreßgeschwindigkeit ist entscheidend für die Qualität der Spanngliedverpressung. Die richtige Einpreßgeschwindigkeit ist entscheidend für eine gute Querläufigkeit des Mörtels im Hüllrohr. Nach DIN 4227 T.5, Abs. 4.4 /7/ sind Pumpendruck und Einpreßgeschwindigkeit auf die Erfordernisse der Spannglieder abzustimmen. Die zulässigen Einpreßgeschwindigkeiten sind i.d.R. in den Zulassungen der Spannverfahren angegeben.

Die maximale Einpreßgeschwindigkeit wird von der Pumpenleistung und dem Hüllrohrdurchmesser bestimmt. Technisch sind Einpreßgeschwindigkeiten von über 50 m/min möglich. Bei Geschwindigkeiten über 30 - 50 m/min sind jedoch Fehlstellen vorprogrammiert. Üblicherweise werden kleinere Einpreßgeschwindigkeiten gewählt, um eine einwandfreie Verfüllung der Hüllrohre zu erreichen. Einpreßgeschwindigkeiten zwischen 5 und 15 m/min werden in /21/ empfohlen. In diesem Bereich ist die Gefahr von Fehlstellen relativ gering. Bei den meisten Spannverfahren liegen die gebräuchlichen Einpreßgeschwindigkeiten in diesem Bereich.

Versuche haben gezeigt, daß gerade bei hohen Einpreßgeschwindigkeiten und großen Hüllrohrdurchmessern die Querläufigkeit zwischen den Litzen nicht mehr gesichert ist /46/. Daher werden in solchen Fällen Geschwindigkeiten kleiner 10 m/min gewählt. Bei vorangegangener Wasserspülung ist die Einpreßgeschwindigkeit im Vergleich zum Fall ohne Wasserspülung ebenso zu vermindern.

Bei Einpreßversuchen an Großspanngliedern mit Einpreßgeschwindigkeiten zwischen 1,40 m/min und 6,00 m/min wurden keine Unterschiede bei der Ummantelung der Spannglieder mit Mörtel festgestellt /39/. Zu einem ähnlichem Resultat führt ein Versuch der Firma VT an einem 120 m langen Spannglied, bei dem mit einer mittleren Einpreßgeschwindigkeit zwischen 4 und 8 m/min eine gute Füllung des Hüllrohrs erreicht wurde /18/.

Die Einpreßgeschwindigkeit sollte jedoch nicht weit unterhalb dieser Grenze liegen, da die Entmischungsneigung bei abnehmender Fließgeschwindigkeit zunimmt /1/.

Da die Probleme beim Verpressen entscheidend von der Spanngliedlänge abhängen, müssen wirklichkeitsnahe Versuche an langen Spanngliedern durchgeführt werden.

7.5 Einpreßdruck

Der Einpreßdruck variiert zwischen 10 - 20 bar (entsprechend 1 und 2 MPa) /21/15/. Der Einpreßdruck wird nach oben beschränkt, um

- ein Platzen der Schläuche, bzw. der Ein- und Austrittsöffnungen zu vermeiden
- Schäden an der Betonkonstruktion zu vermeiden
- Geräte vor Beschädigungen zu schützen
- das Bedienungspersonal zu schützen
- eine Entmischung zu vermeiden

Der Einpreßdruck muß mit Hilfe eines Manometers zwischen Pumpe und Einfüllöffnung während der Verpreßarbeiten kontrolliert werden /15/41/.

Wenn der Mörtel unter Druck steht, neigt er zum Sedimentieren /35/49/50/. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß mit steigendem Druck der Luftgehalt in der Suspension abnimmt. Der Luftgehalt der Suspension entscheidet darüber, wieviel Zementpartikel in Schwebelage gehalten werden können.

Detaillierte Untersuchungen zum Einfluß des Einpreßdruckes auf die Sedimentationsneigung sind nicht bekannt. Im Rahmen der Forschungsarbeit könnte auf diese Fragestellung gezielt eingegangen werden.

7.6 Nachverpressen

Zur Qualitätsverbesserung der Hüllrohrinjektion ist ein Nachverpressen sinnvoll. Ein Nachverpressen von der gleichen Seite wie beim Erstverpressen verspricht jedoch nur wenig Nutzen. Vielmehr sollte von mehreren Punkten aus nachverpreßt werden /18/39/. Das Nachverpressen sollte bei normalen Temperaturbedingungen ($T = 20 - 25^{\circ}\text{C}$) 20 - 30 min nach dem ersten Einpressen erfolgen /18/.

In der pr EN 446 /15/ wird eine Unterscheidung in Nacheinpressen und Nachpressen vorgenommen:

- Nacheinpressen: Zusätzliches Einpressen, um Luft- oder Wasserblasen durch Einpreßmörtel in den Spannkanälen zu ersetzen, bevor der ursprüngliche Einpreßmörtel erhärtet (Druckabschlußverfahren).
- Nachpressen: Zusätzliches Einpressen, um Luft- oder Wasserblasen durch Einpreßmörtel in den Spannkanälen zu ersetzen, wenn der ursprüngliche Einpreßmörtel erhärtet ist.

Beim Nacheinpressen werden die entstandenen Hohlräume nach Beendigung der Einpreßarbeiten unter kontinuierlicher Drucksteigerung weiter verpreßt. Demgegenüber ist der Mörtel beim Nachpressen bereits erhärtet. Beim Nachpressen wird für das Füllen der Hohlräume frischer Einpreßmörtel verwendet. In besonderen Fällen kann das Vakuumverfahren erforderlich werden /15/.

Auch bei Durchlaufträger ist ein Nachverpressen empfehlenswert. Dieses kann durch zusätzliche Einfüllöffnungen an den Tiefpunkten geschehen. Für das Nachverpressen soll ein detaillierter Verpreßplan aufgestellt werden. Ein Beispiel dafür zeigt Bild 14.

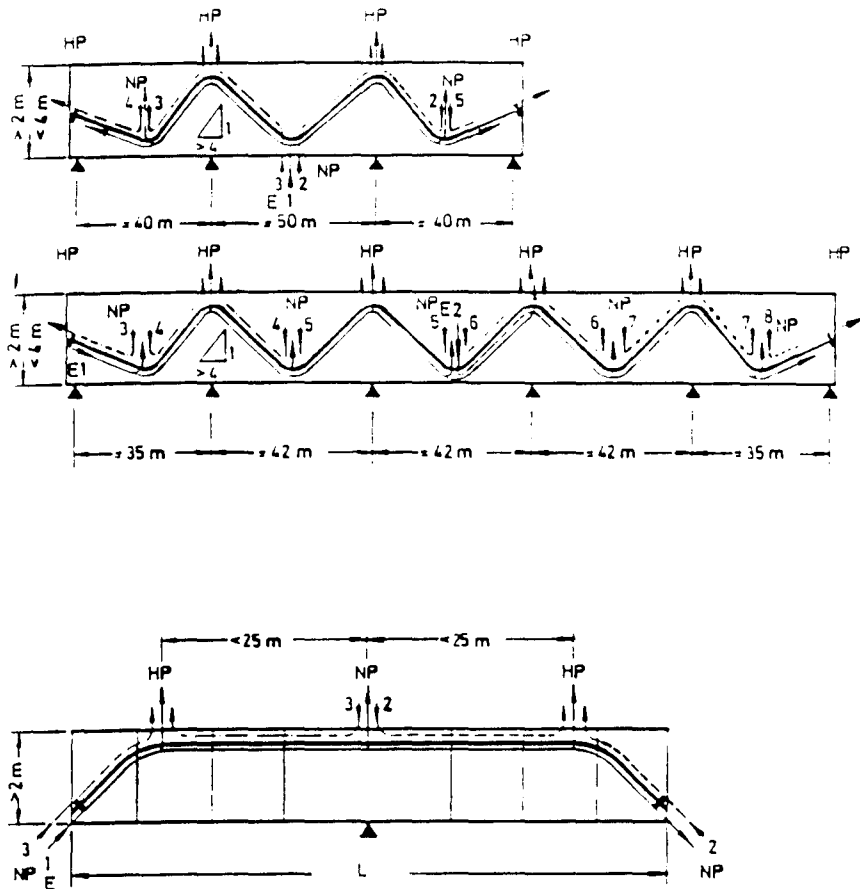


Bild 14: Verpreßplan einschließlich Nachverpressen für einen Durchlaufträger, aus /18/

An kritischen Punkten (Hochpunkt, Koppelstellen, Verankerungen) sollten zum Nachverpressen zusätzliche Ein- und Austrittsöffnungen angeordnet werden. Einige Beispiele sind in den Bilder 11 und 15 angegeben.

Nach /18/ kann auf das Nachverpressen bei Hüllrohrdurchmessern bis 95 mm verzichtet werden, wenn folgende Bedingungen eingehalten sind:

- Höhendifferenz zwischen Hoch- und Tiefpunkt $< 2,0$ m,
- Krümmungsradius > 10 m,
- Hüllrohrneigung $< 1 : 4$

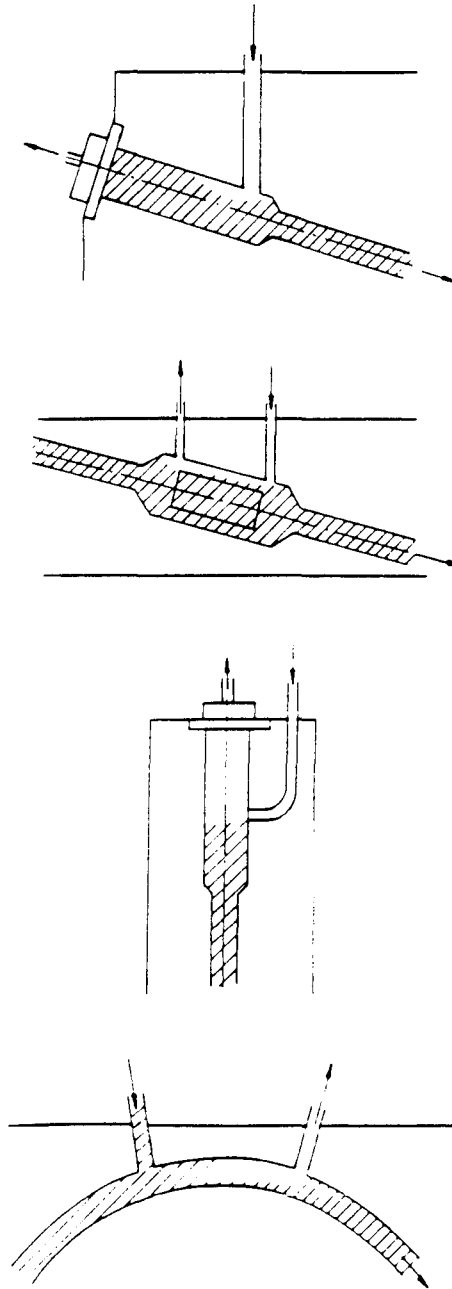


Bild 15: Zusätzliche Ein- und Auslauföffnungen zum Nachpressen, aus /21/

Eine Abwandlung des Nachverpressens stellt das Erhärten unter Druck dar. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten dieses zu realisieren:

- Nachdem Mörtel guter Konsistenz aus den Entlüftungen ausgetreten ist, werden diese geschlossen. Während der Erhärtung wird der Druck über einen gewissen Zeitraum konstant gehalten.

Beim Nachverpressen mit dem Vakuumverfahren sollte die Tauchzeit des Mörtels nach dem Mischen von 30 sec. auf 15 sec. reduziert werden /24/.

In /29/ wird über Verpreßversuche mit dem Vakuumverfahren an lotrechten Spanngliedern berichtet. Verpreßt wurde mit einem PCC-Mörtel. Aufgrund der geringen Mörtelviskosität traten Hohlräume nur am oberen Spanngliedende auf. Diese Hohlräume konnten aufgrund ihrer Lage leicht nachverpreßt werden.

7.8 Temperatur während des Verpressens

Die Erstarrung und Erhärtung des Einpreßmörtels wird entscheidend vom herrschenden Temperaturregime seiner Umgebung (Außenluft, umgebendes Bauwerk, Eigentemperatur des Mörtels) bestimmt. Sowohl zu hohe als auch zu niedrige Temperaturen wirken sich negativ auf die Qualität der Hüllrohrinjektion aus.

7.8.1 Hohe Temperaturen

Wird bei hohen Außentemperaturen verpreßt, kommt es zum schnellen Erstarren des Mörtels. Temperaturen von über 30°C sind als kritisch anzusehen /18/. Neben der Umgebungstemperatur wird die Temperaturgeschichte entscheidend von der Bauteiltemperatur beeinflusst. Werden massige Betonbauteile (z.B. breite Stege von Hohlkastenträgern) bereits wenige Tage nach deren Herstellung vorgespannt und verpreßt, liegen im Betonquerschnitt hohe Temperaturen infolge Hydratationswärmeentwicklung vor. Diese führen zur Erstarrungsbeschleunigung des Einpreßmörtels.

7.8.2 Tiefe Temperaturen

Temperaturen unter 5°C können sich negativ auf die Erhärtung auswirken. Es muß sichergestellt werden, daß die Temperatur während der Erhärtung nicht unter den Gefrierpunkt absinkt. Gegebenenfalls müssen geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden (Querschnitt heizen). Die Temperatur kann durch Temperaturfühler im Bauwerk überwacht werden.

Treten Temperaturen unter dem Gefrierpunkt auf, bevor die Spannglieder verpreßt sind, ist darauf zu achten, daß sich kein Restwasser im Hüllrohr

befindet. Dieses kann Eisdruck verursachen, der schließlich zum Sprengen des Hüllrohres führen kann /49/50/. Schmilzt das Eis erst nach dem Verpressen des Spannglied, verursacht es Hohlräume.

In der pr EN 446 /15/ sind Höchst- und Mindesttemperaturen für Luft, Bauteil und Einpreßmörtel angegeben (Tab. 3). Können diese Temperaturen nicht eingehalten werden, sind besondere Vorkehrungen erforderlich, um das einwandfreie Verpressen der Hüllrohre sicherzustellen.

Temperatur (in °C)	Luft	Bauteil	Einpreßmörtel
Mindest- temperatur	5	5	10
Höchst- temperatur	30	25	25

Tab.3: Temperaturen beim Einpressen (nach pr EN 446, /15/)

7.9 Offene Fragen

Da die Fließverhältnisse im Hüllrohr sehr kompliziert sind (z.B. Welligkeit des Hüllrohrs, enge Zwickel zwischen den Litzen, Reibung), scheinen Eintauch- und Trichterversuch sowie Viskosimeterversuche nicht unbedingt aussagekräftig für die Fließverhältnisse im Hüllrohr. Dort herrscht ein hoher Druck, der insbesondere die Sedimentationsneigung beeinflusst.

In Verpreßversuchen an langen Spanngliedern müssen deswegen die Fließverhältnisse im Hüllrohr eingehend studiert werden (Ausbildung der Mörtelfront, Reibung, Druckverlust, Drainageeffekt, Auspressen von Wasser unter Druck, Sedimentationsneigung).

Zusammenfassend bedürfen folgende Punkte in bezug auf die Verpreßarbeit einer weiteren Klärung:

- Einpressen und Nachpressen
- Temperatur während der Erhärtung

- Durchfluß und Mengenmessung
- Dichtigkeit der Hüllrohre
- Einfluß des Druckes auf das Wasserabsetzen
- Drainageeffekt
- Austreiben von Restwasser
- Erhärten unter Druck
- Arten des Nachverpressens
- Verpressen von geeigneten Spanngliedern, Ankern und Koppelstellen

8. ZERSTÖRUNGSFREIE MESSTECHNIK

Die zerstörungsfreie Prüfung von Stahlbetonbauteilen ist seit langem eine Ziel der Forschung. Es zeigt sich jedoch, daß die zerstörungsfreie Meßtechnik durch die Inhomogenität des Stahlbeton ungleich schwieriger in den Griff zu bekommen ist als beispielsweise bei Metallen. In der Vergangenheit wurden einige Verfahren teilweise erfolgreich eingesetzt, wenn es um das Auffinden von Fehlstellen an der schlaffen Bewehrung geht. Dazu gehören Röntgen, Ultraschall und Radar /37/. Da alle diese Verfahren relativ aufwendig sind, ist eine vollständige Kontrolle eines Bauwerkes nur im Ausnahmefall gerechtfertigt. Ansonsten können sie lediglich zur Begutachtung von lokalen Schäden herangezogen werden. Die verschiedenen Meßmethoden sind in /37/ eingehend diskutiert. Das Ergebnis kann folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- Ultraschall: Wellen breiten sich kugelförmig aus, dadurch Reflektionen an den Übergängen der unterschiedlichen Stoffen mit verschiedenen Dichten; unterschiedliche Schalllaufzeit
- Radar: gerichtete Strahlen, dennoch Reflektionen möglich, Hohlräume im Innern von Hüllrohren können nicht entdeckt werden, da das Hüllrohr ein Faraday'scher Käfig ist; keine elektromagnetische Durchstrahlung möglich.
- Röntgen: Aufgrund der Abbildungstechnik können nur sehr begrenzte Ausschnitte von Bauteilen untersucht werden. Die Interpretation der Bilder ist ausgesprochen schwierig. Außerdem sind Röntgenstrahlen bezüglich der Umweltverträglichkeit kritisch.

Als Resümee wird in /37/ festgestellt, daß zum augenblicklichen Zeitpunkt keines der vorgestellten Meßverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Stahlbetonbauteilen ausgereift ist. Eine breite Anwendung ist nicht möglich.

In der letzten Zeit konnten bei Spanngliedern mit sofortigem Verbund mit großem Erfolg Spannstahlbrüche aufgefunden werden. Bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund erscheint das Verfahren schwierig, da der Spannstahl von außen durch das Hüllrohr nicht magnetisiert werden kann (Faraday'scher Käfig).

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens interessiert jedoch nicht das Auffinden von Spannstahlbrüchen, sondern das Auffinden von Hohlräumen innerhalb des Hüllrohres. Dafür ist dieses Verfahren nicht geeignet.

Obwohl ein Fortgang der Entwicklung nicht ausgeschlossen wird, muß bezweifelt werden, daß es gelingt, in absehbarer Zeit Hohlräume innerhalb von Hüllrohren durch zerstörungsfreies Messen sicher aufzufinden.

9. QUALITÄTSSICHERUNG

Die Qualitätssicherung während der Bauausführung rückt immer mehr in den Vordergrund. Komplette QS-Systeme, in denen die zu stellenden Anforderung formuliert werden, fehlen z. Z. noch weitgehend. Insbesondere bei so empfindlichen Systemen wie den Spannverfahren ist eine lückenlose Qualitätssicherung unabdingbar.

Dennoch sind gerade beim Verpressen Lücken im QS-System offensichtlich. Um nur einige zu nennen:

- das Finden von geeigneten Zementen
- Eignungs- und Güteprüfung von Zementen und Mörteln
- fehlende Kontrollmöglichkeiten über den Füllungsgrad des Spannglieds.

Die Forschungsarbeit will dazu beitragen, anhand der Versuchsergebnisse geeignete Kriterien für die Sicherung und Verbesserung der Qualität der Spanngliedverpressung zu finden.

9.1 Mörtel

Wie bereits erwähnt, sind nicht alle Zemente einer Güteklasse für das Verpressen von Spanngliedern geeignet. Die Auswahl des Zementes bzw. des Zementwerkes geschieht heute überwiegend auf der Basis von Erfahrung der Ausführenden. Es ist nicht bekannt, über welche Kriterien die Zementindustrie für die Auswahl und Herstellung von Zementen für Einpreßmörtel verfügt.

Im Rahmen des QS-Konzeptes könnten Kriterien für die Eignungsprüfung von Zementen für Einpreßmörtel abgeleitet werden. Das QS-Konzept sollte Aussagen über die generelle Eignung eines Zementes für Einpreßmörtel ermöglichen. Darüber hinaus sollte das QS-Konzept Kriterien zur Güteprüfung enthalten, so daß für alle Lieferchargen die gleichen Verarbeitungs- und Qualitätsbedingungen sichergestellt sind.

9.2 Hüllrohre

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die Qualität der Hüllrohre i.a. nicht zu bemängeln. Dennoch ist fraglich, ob die geltenden Normen (DIN 4227, T.5, DIN 18553, EC 2) ausreichend sind, um einen qualitativ hochwertigen Hüllrohrkanal auf der Baustelle zu erreichen. Damit sind insbesondere die Dichtheit und die Formstabilität gemeint. In bezug auf die Verbesserung der Dichtheit ist sicherlich noch ein erhebliches Entwicklungspotential vorhanden.

9.3 Verpreßarbeiten

Obwohl das Verpressen von Spanngliedern für die Dauerhaftigkeit sehr wichtig ist, ist eine Überprüfung des Verpreßerfolges während der laufenden Arbeiten z. Z. ausgesprochen schwierig, teilweise sogar unmöglich. Sorgfalt und Erfahrung der Ausführenden sind heute die wesentlichen Gütekriterien.

Der überwiegende Teil der Schäden an bestehenden Bauwerken ist überwiegend auf Mängel bei der Verpreßarbeit zurückzuführen. Die Schäden lassen sich in zwei Hauptursachen einteilen:

- Spannglieder sind nur teilweise verpreßt
- Spannglieder sind überhaupt nicht verpreßt.

Die teilweise Verfüllung von Spanngliedern kann verschiedene Ursachen haben (Verstopfer, Drainageeffekt, fehlende Entlüftung). Sie beruhen auf Konstruktionsmängeln, mangelnder Sorgfalt bei der Ausführung oder auf mangelnden bzw. fehlenden Kontrollmöglichkeiten. Zur Minimierung derartiger Fehler kann die Forschungsarbeit beitragen.

Demgegenüber sind überhaupt nicht verfüllte Spannglieder eindeutig auf gravierende Nachlässigkeiten bei der Ausführung zurückzuführen. Derartige Fehler dürfen in keinem Fall auftreten. Die Qualitätsüberwachung auf der Baustelle muß gewährleisten, daß solche Fehler ausgeschlossen sind.

Früher wurde die Notwendigkeit für eine besonders gute und sorgfältige Verpreßarbeit offenbar häufig übersehen. Vielmehr stand zur Befriedigung des Baubedarfes die schnelle Abwicklung von Bauwerken im Vordergrund. Kann

während der Verpreßarbeiten aus Zeitmangel jedoch nicht höchste Sorgfalt walten, sind Qualitätseinbußen vorprogrammiert.

Für die Zukunft müssen geeignete Kriterien für ein Qualitätssicherungskonzept zusammengestellt werden, die zur Qualitätssteigerung beitragen. Dabei ist zwischen unabdingbar notwendigen Kriterien und zusätzlichen Kontrollmaßnahmen zu unterscheiden /55/. Bei den unabdingbaren Kriterien handelt es sich um Kontrollen, die bei allen Bauwerken durchgeführt werden. Zusätzliche Kontrollmaßnahmen werden ergriffen, wenn an das Bauwerk besondere Qualitätsanforderungen gestellt werden.

Beispiele für unabdingbare Kontrollmaßnahmen bezüglich des Verpressens:

- Durchgängigkeit des Hüllrohres
- Dichtigkeit des Hüllrohres
- Mörtelzusammensetzung
- Mörtel Eigenschaften
- Bauteiltemperatur
- Einpreßmengen
- Einpreßdruck
- Arbeitsprotokoll über Verpreßvorgang (z. B. Reihenfolge, Mengen, Besonderheiten, usw.)

Beispiele für zusätzliche Kontrollmaßnahmen:

- Prüfung der Durchgängigkeit mit Hilfe der Endoskopie (in Zweifelsfällen)
- Ermittlung des zu verpressenden Volumens a priori
- Durchflußmessung, Mengenbilanz

9.4 Arbeitsplan für Verpreßarbeiten

Um eine hohe Qualität der Hüllrohrinjektion zu erreichen, sollte ein detaillierter Arbeitsplan entwickelt werden. In Anlehnung an die DIN 4227 T.12 kann dieser folgendermaßen aussehen:

- Höchstlänge der Einpreßabschnitte 50 m
- Auslauföffnungen an Hochpunkten, Ankern und Koppelstellen
- Kennzeichnung der Ein- und Auslauföffnungen, damit eine Zuordnung zu den Spanngliedern möglich ist

- Einpreßabschnitte festlegen (in welcher Reihenfolge werden die Ein- und Auslauföffnungen benutzt)
- Prüfung von Durchgängigkeit und Dichtigkeit der Hüllrohre
- Einpreßgeschwindigkeit zwischen 5 und 15 m/min
- Einpressen vom niedrigsten Punkt
- Verpressen, bis die Mörtelkonsistenz an der Austrittsöffnung der an der Einfüllöffnung entspricht
- Austrittsöffnungen in Fließrichtung nacheinander schließen
- Austrittsöffnungen 10 min nach dem Ende des Einpressens öffnen, damit abgesondertes Wasser und Luft aufsteigen kann
- Austrittsöffnungen auf Luft- und Wasseransammlungen in bestimmten Zeitabständen kontrollieren; eventuelle Hohlräume nachverpressen

Dieses ist zunächst nur ein modellhaftes Beispiel für einen Arbeitsplan für das Verpressen von Spanngliedern. Die Optimierung eines solchen Arbeitsplanes ist erst in Anschluß an die Forschungsarbeit möglich. Außerdem ist dafür eine enge Zusammenarbeit mit der Praxis notwendig.

10. ARBEITSPROGRAMM

10.1 Vorbemerkungen

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in Labor- und Injektionsversuche. In Laborversuchen soll in erster Linie den offenen Fragen bei der Mörtelherstellung nachgegangen werden. Dabei sollen keine neuen Mörtel entwickelt werden. Vielmehr sollen die in der Praxis gebräuchlichen Mörtel verwendet werden. Deren Eigenschaften sollen untersucht werden.

Bei den Injektionsversuchen soll den offenen Fragen in den Bereichen Konstruktion, Verfahrenstechnik und Verpreßarbeit nachgegangen werden. Für das Erzielen einer hohen Aussagekraft sind für die Versuchsdurchführung möglichst praxisnahe Bedingungen anzustreben. Die Versuche sollen deswegen von erfahrenem Personal unter Verwendung von baustellenüblichen Geräten durchgeführt werden.

10.2 Laborversuche

10.2.1 Mörtel

Die Mörteluntersuchungen im Labor dienen dazu, die Unterschiede der jeweiligen Stoffe aufzuzeigen. Im Bereich der Mörtel geht es darum, welche Zemente für Verpreßarbeiten geeignet sind, bzw. wie die Mörtелеigenschaften durch die Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen optimiert werden können. Im Zusammenhang mit den Zementen interessiert besonders, warum einige Zemente für das Verpressen geeignet sind, andere wiederum nicht. Dabei werden nur PZ 45 F-Zemente einbezogen. Als Zement Z 1 wird ein solcher Zement gewählt, der sich auch unter ungünstigen Bedingungen "gutmütig" verhält. Drei weitere Zemente, Z 2 bis Z 4, werden so ausgewählt, daß sie i.w. den gleichen Blaine-Wert aufweisen, sich aber im C_3A - und SO_3 -Gehalt deutlich unterscheiden. Da derartigen Überlegungen zum Z 1 auch von Spannbetonfirmen angestellt werden, ist Absprache erforderlich.

Folgenden Fragen soll nachgegangen werden:

- chemische Analysen von Zementen
- Glühverlust (Anlagerungen von H_2O und CO_2)

- Spezifische Oberfläche, Mahlfeinheit nach Blaine
- Korngrößenverteilung mit Lasergranulometer
- Eigenschaften (Wasserabsetzen, Viskosität, Erstarrungsfunktion)
- Zusatzmittel (EH, FM, Quellmittel)
- Si-Staub Slurry Zugabe
- Dichtigkeit und Alkalität des Mörtels
- Porosität

Den Mikrozepten soll hier nicht nachgegangen werden, da Prof. Gröbl sich mit diesen im Auftrag des DBV befassen wird.

10.2.2 Hüllrohre

Den offenen Fragen im Bereich der Hüllrohre soll im Rahmen der Injektionsversuche nachgegangen werden. Im Vordergrund steht die Frage nach der Dichtheit und der Deformierbarkeit unter Baustellenbedingungen. Es klafft offenbar eine Lücke zwischen der Prüfung der Hüllrohre unter Laborbedingungen (DIN 18553) und den zu erwartenden Bedingungen auf der Baustelle. Die geltenden Normen (DIN 4227, T.1, EC 2) sind eher unzureichend. Gleichwohl ist zur Verbesserung der Spanngliedinjektion im Bereich der Hüllrohre offensichtlich erhebliches Entwicklungspotential vorhanden.

Im Rahmen der Forschungsarbeit könnten auch Kunststoffhüllrohre eingesetzt werden, deren globale Dichtheit einen besseren Korrosionsschutz verspricht. Eine weitreichende Betrachtung zum Einsatz von Kunststoffhüllrohren ist jedoch nicht das Hauptziel der Forschungsarbeit. Es sei daher auf /38/42/ verwiesen.

Folgenden Fragen soll bei den Hüllrohren nachgegangen werden:

- Durchmesser
- praxisnahe Dichtheit
- Sicken, Profilierung
- Blechdicke
- PE-Hüllrohre
- Querschnittsveränderungen (Eindellungen, Aufweitungen)
 - Auswirkung auf die Rohrhydraulik

10.3 Injektionsversuche

10.3.1 Prüfstand

Da die erfolgreiche Spanngliedinjektion von mehreren Parametern gleichzeitig abhängt, müssen in einem Versuch möglichst viele davon kombiniert werden. Im Rahmen der Forschungsarbeit sollen lange Spannglieder mit 50 bis 100 m Länge verpreßt werden, da die Schwierigkeiten beim Verpressen mit der Spanngliedlänge überproportional ansteigen.

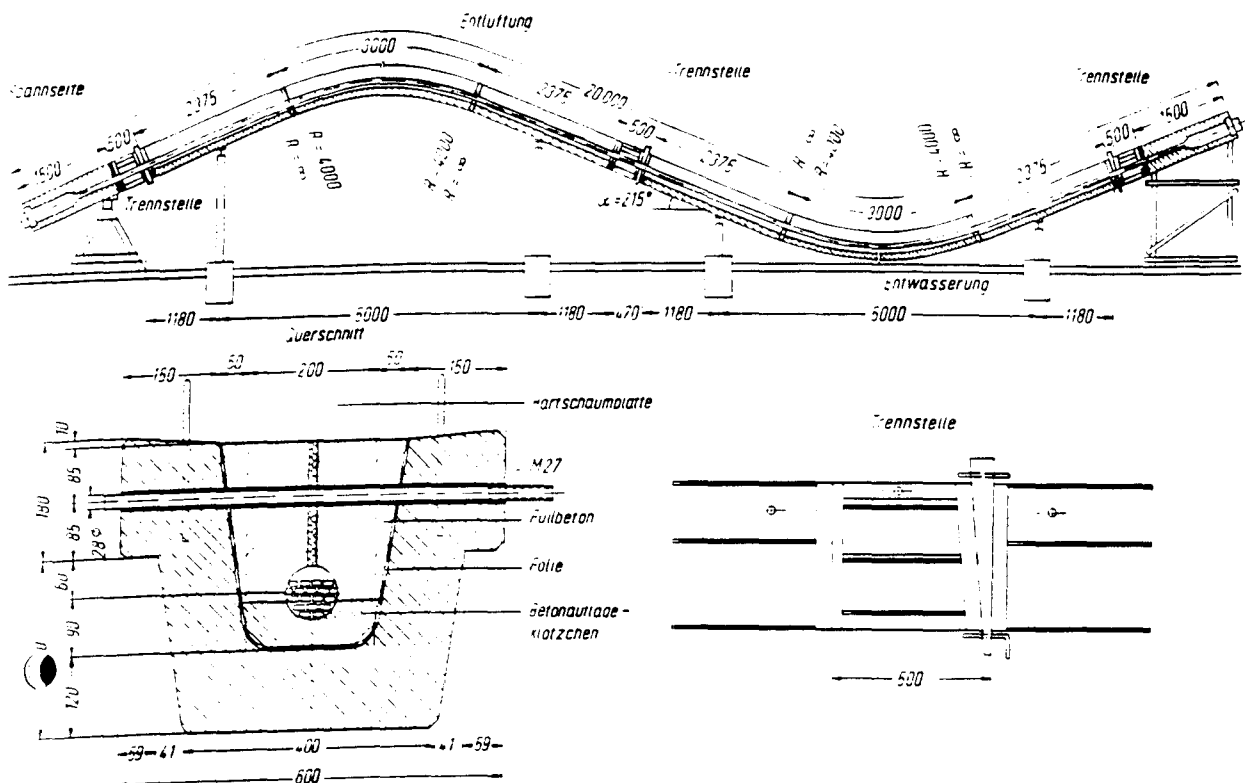


Bild 17: Injektionsprüfstand, aus /39/

Die Durchführung der Versuche soll an einem speziellen Prüfstand erfolgen. Ein solcher Stand wurde bereits in den 70 er Jahren für Einpreßversuche beschrieben /39/. Dieser Stand ist in Bild 17 dargestellt. Bei den durchzuführenden Versuchen soll der Injektionsprüfstand der SUSPA eingesetzt werden. Bei den Injektionsversuchen werden Modellspannglieder und anschließend Großspannglieder verpreßt.

10.3.2 Modellspannglieder

An Modellspanngliedern sollen gezielten Fragen nachgegangen werden. Als Modellspannglieder werden bezeichnet:

- Spannglieder bis 15 m Länge sowie
- Anker, Trompeten und Koppelstellen.

Im Rahmen der Versuche sollen in mehreren Arbeitsblöcken Modellspannglieder verpreßt werden. Neben verfahrenstechnischen Fragen soll die Qualität der Injektion nach dem Erhärten des Mörtel untersucht werden. Dazu werden die Spannglieder zerlegt. Begleitend werden Mörteluntersuchungen durchgeführt. Dabei geht es v.a. um die Eigenschaften des Frischmörtels (Fließvermögen, Wasserabsondern, usw.) und weniger um die Eigenschaften des erhärteten Mörtels (Festigkeit, Porosität, Alkalität, usw.).

a) Zusammenstellung der verfahrenstechnischen Fragen:

- Verfüllung von Koppelstellen, Trompeten,
- maximale Neigung der Spannglieder,
- Erhärten des Mörtels unter Druck,
- Hüllrohrdichtigkeit,
- Volumenmessung,
- Durchflußmessung

b) Zusammenstellung der Fragen bezüglich der Mörtel Eigenschaften:

- Eigenschaften des Frischmörtels im Hüllrohr (Fließvermögen, Wasserabsetzen, Quellen),
- Festigkeit,
- Porosität des erhärteten Mörtels aus dem Hüllrohr

10.3.3 Großspannglieder

Die Großspannglieder haben eine Länge von bis zu 100 m. Die bei den Versuchen maximal mögliche Spanngliedlänge hängt vom Prüfstand ab. Das Verpressen von Großspanngliedern muß unter praxisnahen Bedingungen erfolgen.

Wegen der hohen Kosten muß in einen Versuch mehreren Fragestellungen gleichzeitig nachgegangen werden. Außerdem sollen die beim Verpressen von Modellspanngliedern gewonnenen Erfahrungen in die Großversuche einfließen.

Insgesamt können kaum mehr als zwei Großversuche durchgeführt werden. Ein Großspannglied besteht aus rund 19 - 20 0,6" Litzen, eines aus 7 mm Drähten mit gleicher Nennvorspannkraft. Das Großspannglied wird leicht gespannt.

Folgenden Fragen soll nachgegangen werden:

- Drainageeffekt
- Querläufigkeit
- Verpreßbarkeit langer Spannglieder
- hohe Temperaturen während der Injektion
(Dazu wird das Stahlhüllrohr in ein temperiertes wasserdurchströmtes Kunststoffhüllrohr gelegt; es können beliebige Temperaturgeschichten gefahren werden.)
- Einfluß des Einpreßdruckes (Neigung zum Sedimentieren)
- Verpreßgeschwindigkeit
- Hüllrohrdurchmesser und -gestaltung (Sickenform und -größe)
- Querschnittsveränderungen (Verengungen, Aufweitungen)
- Überprüfung der Einpreßmenge / -volumens, Mengenbilanz
- Nachverpressen (Zeitpunkt, Häufigkeit)
- Verpressen mit Packern (Ziel: Erhärtung unter konstantem Druck; Minimierung der Luftporen)
- Vakuumverpressen
- Hüllrohrinspektion mit Hilfe der Endoskopie
- Austreiben von Restwasser

Da die umfassende Bearbeitung aller Punkte bei wenigen Großversuchen nicht möglich ist, muß durch Diskussion mit den Beratern geklärt werden, welche dieser Punkte für die Praxis von besonderer Bedeutung sind.

Zusätzlich zu den Großversuchen wären Versuche an Bauwerken wünschenswert. Diese Versuche bedürfen der Absprache mit den Bauherren und ausführenden Firmen. Ob dies verwirklicht werden kann, ist nicht vorauszusagen.

10.4 Bestehende Bauwerke

Gerade die Kenntnis von Schadensursachen trägt dazu bei, in der Zukunft Fehler zu vermeiden. Die Schäden und deren Ursachen sollen zusammengetragen und systematisiert werden. Darüberhinaus kann an abzubrechenden Bauwerken der

Qualität der Spanngliedinjektion nachgegangen werden. Die dafür notwendigen Untersuchungen können mit relativ geringem Kostenaufwand durchgeführt werden.

10.5 Realisierungsrahmen

Die Untersuchungen sind breit angelegt. Inwieweit allen Fragen zufriedenstellend nachgegangen werden kann, hängt noch von gesuchter Industriebeteiligung ab.

11. ZUSAMMENFASSUNG

In dem hier vorgelegten Zwischenbericht wurden zunächst die in der Vergangenheit aufgetreten Schäden und Probleme beim Verpressen von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund vorgestellt. Daraus wurden offene Fragen abgeleitet und diskutiert. Es stellt sich heraus, daß der Erfolg der Injektion maßgeblich von der Sorgfalt bei der Ausführung abhängt. Durch die immer wieder auftretenden Schäden sind in der Vergangenheit Richtlinien /21/41/ und Normen /10/15/ für die Verpreßarbeit entstanden. Dennoch erscheinen Ergänzungen und Erweiterungen angebracht.

Im Bereich der Baustoffe ist insbesondere bei den Mörteln zusätzlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf vorhanden. Die Auswahlkriterien für Zemente für Verpreßarbeiten können im Zeitalter einer modernen Qualitätssicherung als antiquiert gelten. Eine Aktualisierung der Beurteilungskriterien scheint überfällig. Aktuelle Erfolge bei der Mörtelentwicklung zur RiBinjektion belegen das Entwicklungspotential bei Zementen und Mörteln.

Obwohl bei der Maschinenteknik z.Z. wenig Probleme auszumachen sind, gibt es auch hier neue Tendenzen. Neben dem Einbau von Druckmesser scheint der Einsatz von Druckflußmessern angebracht. Derartig ausgestattete Verpresseinheiten existieren bereits. Deren Einsatzfähigkeit bedarf weiteren Untersuchungen.

Ein anderes Gebiet mit großem Einfluß auf den Verpreßerfolg stellt die Art und Weise der Spanngliedverlegung auf der Baustelle dar. Dabei ist es besonders wichtig, die Spannglieder unverschieblich an der schlaffen Bewehrung zu befestigen. Außerdem ist die Dichtigkeit der Hüllrohre von großer Bedeutung. Zur Beurteilung der Hüllrohrdichtheit auf der Baustelle ist die geltende Hüllrohrnorm /9/ nicht geeignet und auch nicht vorgesehen. Die geltenden Normen für Spannverfahren /6/10/ sind in dieser Hinsicht jedoch ebenso wenig aussagekräftig.

Aufgrund der offenen Fragen wurde ein Arbeitsplan entwickelt, nach dem im Rahmen der Forschungsarbeit vorgegangen werden soll. Die Arbeiten gliedern sich in zwei Hauptabschnitte: in Laborversuch an Mörteln und in Injektionsversuche an Modell- und Großspanngliedern. Anhand der Versuche

sollen Ratschläge zur Verbesserung der Injektion von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund werden.

12. LITERATUR

- /1/ Benz, G., Einpreßmörtel, Eigenverlag Chem. Fabrik Grünau, Illertissen, 3. Auflage 1984; 2. Teil: Literaturangaben
- /2/ Der Bundesminister für Verkehr - Abteilung Straßenbau, Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken, bearbeitet v. R. Ruhrberg u. H. Schumann, Dokumentation 1982
- /3/ Der Bundesminister für Verkehr - Abteilung Straßenbau, Erhaltungsarbeiten an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken von Straßen, bearbeitet v. R. Ruhrberg, Dokumentation 1990
- /4/ DAfStb-Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 206
- /5/ DAfStb-Richtlinie zur Anwendung von EC 2
- /6/ DIN 4227, T.1, Spannbeton; Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung, Juli 1988
- /7/ DIN 4227, T.5, Spannbeton; Einpressen von Zementmörtel in Spannkanäle, Dez. 1979
- /8/ DIN 18553, Hüllrohre aus Bandstahl für Spannglieder; Febr. 80
- /9/ DIN 18553, Hüllrohre aus Bandstahl für Spannglieder - Entwurf; März 89
- /10/ EC 2, Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, T.1 Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau, Deutsche Fassung ENV 1992-1-1, Juni 1992
- /11/ EC 2, Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, T.2, Stahlbeton- und Spannbetonbrücken
- /12/ EN 196, Prüfverfahren für Zement
- /13/ ENV 197, Zement - Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien
- /14/ pr EN 445, (entspricht DIN 4227, T.11), Spannbeton; Einpreßmörtel für Spannglieder, Prüfverfahren, Vorschlag zur Europäischen Norm, März 1991
- /15/ pr EN 446, (entspricht DIN 4227, T.12), Spannbeton; Einpreßmörtel für Spannglieder, Einpreßverfahren, Vorschlag zur Europäischen Norm, März 1991
- /16/ pr EN 447, (entspricht DIN 4227, T.10), Spannbeton; Einpreßmörtel für Spannglieder, Anforderungen für übliche Einpreßmörtel, Vorschlag zur Europäischen Norm, März 1991
- /17/ EN 104.300, Zusatzmittel für Beton
- /18/ Engelke, P., Jungwirth, D., Manns, W., Zur Einpreßtechnik bei Spanngliedern mit mehr als 1500 kN Spannkraft, Mitteilungen d. Instituts f. Bautechnik, Heft 6/1979, S. 161-166

- /19/ Engelke, P., Zum Stand der Einpreßtechnik im Spannbetonbau, Beton und Stahlbetonbau Heft 6/86, S. 147-150
- /20/ Fiedler, O., Strömungs- und Durchflußmeßtechnik, Verlag Oldenbourg 1992, ISBN 3-486-22119-1
- /21/ FIP-Guide to good practice, Grouting of tendons in prestressed concrete, published by Thomas Telford, London, 1990
- /22/ FIP-State of art report, Condensed silica fume in concrete, published by Thomas Telford Ltd. London, 1988
- /23/ Gjorv, O.E., Loland, K.E., Condensed silica fume in concrete, Institut for Byggingsmateriallaere, University of Trondheim, report February 1982
- /24/ Gottstein v., V., Nachträgliches Verfüllen von nicht verpreßten Spanngliedern mit dem Vakuumverfahren, in Spannbeon in der Bundesrepublik Deutschland 1983 - 1986, Beitrag zum intern. Spannbetonkongreß in Neu Delhi 1986
- /25/ Hope, B.B., Ip, A., Grout for post-tensioning ducts, ACI-journal, July-August 1988
- /26/ IfBt, Sachverständigenausschuß "Spannverfahren", 14. Sitzung des SVA-A am 18.02.93
- /27/ Jungwirth, D., Beyer, E., Grübl, P., Dauerhafte Betonbauwerke, Substanzerhaltung und Schadensvermeidung in Forschung und Praxis, Beton-Verlag, 1986
- /28/ Kern, G., Jungwirth, D., Untersuchungsergebnisse an abgebrochenen Spannbeton-Brücken, die Jahrzehnte unter Verkehr standen, Beton- und Stahlbetonbau 4/71, S.86-93
- /29/ Kordina, K., Osterroth, H.-H., Zum nachträglichen Verpressen scher zugänglicher Spannglieder, Bauingenieur 62 (1987), S. 159-164
- /30/ Kühling, G., Feinstzemente - mikrofeine hydraulische Bindemittel, Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Heft 11/1990
- /31/ Kühling, G., Rißverpressung mit Feinstzementen, Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 3/1992
- /32 / Kühling, G., Schulze, B., Tax, M., Neue Zusatzmittel für feststoffreiche Feinstzement Suspensionen, Bauingenieur, Bd. 67, Heft 11/1992
- /33/ Kuipers, U., Wirbel-Wirkdruck-Durchflußmessung, Forschungsberichte VDI, Reihe 8, Meß-, Steuer- und Regelungstechnik, Nr. 189
- /34/ Locher, F.W., Richartz, W., Sprung, S., Erstarren von Zement, Zement-Kalk-Gips 1. Teil Heft 10/76, S. 435-442, 2. Teil Heft 6/80, S. 271-277
- /35/ Manns, W., Zimbelmann, R., Einpreßmörtel mit langer Verarbeitungszeit, im Heft 353 DAFStb, 1984

- /36/ Martin, H., Materialuntersuchungen an Spannstahl und Einpreßmörtel; Karbonatisierung und Chloridgehalt des Betons; im Heft 271 DAfStb
- /37/ Matt, P., Zerstörungsfreie Prüfung von Spanngliedern in bestehenden Brückenbauten, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement - Bundesamt für Straßenbau, Bericht zum Forschungsauftrag 52/88, Januar 1989
- /38/ Matt, P., Qualitätsgesicherte und überwachbare Spannsysteme im Brückenbau, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement - Bundesamt für Straßenbau, Bericht zum Forschungsauftrag 81/89, September 1990
- /39/ Mühe, L., Jllgner, W., Vergleichende Einpreß- und Ausziehversuche an großen Spanngliedern, Beton- und Stahlbetonbau Heft 3/75, S. 52-58
- /40/ Nürnberger, U., Analyse und Auswertung von Schadensfällen an Spannstählen, Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 308, herausgegeben von Bundesminister für Verkehr, 1980
- /41/ PCI Committee on Post-Tensioning, Recommended Practice for Grouting of Post-Tensioned Prestressed Concrete, PCI Journal, Nov.-Dec. 1972
- /42/ Podolny, W., Corrosion of prestressing steels and its migration, PCI-Journal, Sep./Oct. 1992
- /43/ Ranisch, E.-H., Rostásy, F.S., Herschelmann, F., Properties of cement grouts with silica fume addition for injectin of post-tensioning ducts, Trondheim Conference 1989
- /44/ Rheologie of fresh cement and concrete, edited by P.F.G. Banfill, E & FN Spon, Chapman and Hall, 1991
- /45/ Rostásy, F.S., Ranisch, E.-H., Herschelmann, F., Untersuchungen der Eigenschaften von Einpreßmörteln mit Zusatz von Silika, Teil I und II, Forschungsbericht iBMB, Baunschwieg, 1987
- /46/ Rostásy, F.S., Scheuermann, J., Verpressersuche an Spanngliedern, Untersuchungsbericht, unveröffentlicht
- /47/ Rostásy, F.S., Untersuchungsbericht zu Schäden an einer Spannbetonbrücke, 1993
- /48/ Schütt, K., Diederichs, U., Rostásy, F.S., Improvement of performance af grouts for corrosion protection of post-tensioning tendons by silika fume addition
- /49/ Schupack, M., Protecting post-tensioning tendons in concrete structures, Civil Engineering-ASCE, Dec. 1982, S. 43 (siehe auch 9th FIP-Congress, Stockholm 1982)
- /50/ Schupack, M., Protecting post-tensioning tendons in concrete structures, Civil-Engineering-ASCE, Dec. 1982
- /51/ Schupack, M., A Survey of the Durability Performance fo Post-Tensioning Tendons, ACI Journal, Oct. 1978

- /52/ Schupack, M., Suarez, M.G., Some Recent Corrosion Embrittlement Failures of Prestressing Systems in the United States, PCI Journal, March-April 1982
- /53/ SIA Norm 162, Schweizerische Norm für Betonbauten, Ausgabe 1989
- /54/ Society's Design Group, Grouting Specifications, Concrete July/August 1993
- /55/ Raiss, M.E., Durable post-tensioned concrete bridges, Concrete May/June 1993
- /56/ Zimbelmann, R., Einpreßmörtel mit langer Verarbeitungszeit, 15. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschuß für Stahlbeton, 1984
- /57/ ZTV-K 80, Zusätzliche Technische Vorschriften für Kunstbauten, Bundesminister für Verkehr, Ausgabe 1980
- /58/ ZTV-K 88, Zusätzliche Technische Vorschriften für Kunstbauten, Bundesminister für Verkehr, Ausgabe 1988

